



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## STUDIE FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN NA JIŽNÍ MORAVĚ

STUDY OF FREE-FIELD PHOTOVOLTAIC PLANTS IN SOUTH MORAVIA

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Bařinka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. David Bařinka

**ID:** 145967

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Studie fotovoltaických elektráren na jižní Moravě

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti fotovoltaických elektráren z pohledu ČR. Uveďte přehledně princip jejich činnosti a jejich efektivitu a stanovte jejich procentuální materiálové složení fotovoltaických panelů. Popište, přehledně aktuální vývoj a stav fotovoltaických elektráren na území ČR, včetně celkové výkonového přínosu. Na základě průzkumu vypracujte statistické hodnocení poruch, a dále se zaměřte na ekologické faktory. Zpracujte predikci, co se bude dít s elektrárnami na konci státní podpory a na konci životnosti samotných panelů. Popište, jak probíhá a bude probíhat ekologická likvidace nefunkčních panelů v souvislosti s platnou legislativou.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 25.5.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Lukáš Fujcik, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je studií o budoucnosti fotovoltaických elektráren v České republice. Popisuje historii, skladbu, principy fotovoltaických elektráren a typy závad. Zaměření je především na budoucnost a recyklaci fotovoltaických elektráren a panelů. Závěr popisuje a vyhodnocuje vlastní průzkum zaměřený na provozovatele fotovoltaických elektráren.

## **Klíčová slova**

fotovoltaika, recyklace, ekologie, závady, průzkum

## **Abstract**

This dissertation is the study about the future of solar power stations in the Czech Republic, describing the history, composition, principle of solar power stations and types of defects. Is primarily focuses on the future and recycling of solar power stations and solar panels. The conclusion of this disertation describes and evaluates own survey which is oriented on operators of the solar power stations.

## **Keywords**

photovoltaic, recycling, ecology, defects, survey

BAŘINKA, D. *Studie fotovoltaických elektráren na jižní Moravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 68 s.  
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Studie fotovoltaických elektráren na jižní Moravě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č.

121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 19. 5. 2017

.....

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivanovi Szendiuchovi, CSc. za účinnou, metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl za cenné rady, nápady a doporučením zahraniční literatury poděkovat Ing. Manuele Franz z TU Wien.

V Brně dne 19. 5. 2017

.....

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 REŠERŠE .....</b>	<b>12</b>
1.1 VZNIK A HISTORIE FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN.....	12
1.2 PŘÍČINY SOLÁRNÍHO BOOMU V ČESKÉ REPUBLICE .....	12
1.3 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE .....	15
<b>2 PŘEHLED PRINCIPU ČINNOSTI A EFEKTIVITY .....</b>	<b>20</b>
2.1 ZDROJ SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ .....	20
2.2 VYUŽITÍ SLUNEČNÍ ENERGIE.....	22
2.3 FOTOELEKTRICKÝ JEV .....	24
2.4 FOTOVOLTAICKÝ JEV .....	24
2.5 PRINCIP FUNKCE FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU .....	25
2.6 ČLÁNKY TVOŘENÉ POLYKRISTALICKÝM KŘEMÍKEM .....	26
2.7 ČLÁNKY TVOŘENÉ MONOKRYSTALICKÝM KŘEMÍKEM .....	28
2.8 ČLÁNKY TVOŘENÉ AMORFNÍM KŘEMÍKEM .....	30
2.9 PODÍL TECHNOLOGIÍ NA TRHU .....	31
<b>3 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ.....</b>	<b>32</b>
3.1 FOTOVOLTAICKÝ PANEL.....	32
3.2 ZÍSKANÝ VÝKON .....	33
3.3 ŽIVOTNOST FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ .....	34
3.4 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ PANELŮ .....	35
3.5 RECYKLACE VYSLOUŽILÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN.....	37
<b>4 PRINCIP FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN.....</b>	<b>40</b>
4.1 OBECNÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ .....	40
4.2 OSTROVNÍ SYSTÉM .....	42
<b>5 TYPY ZÁVAD .....</b>	<b>46</b>
5.1 ZÁVADY ZPŮSOBENÉ HLODAVCI.....	46
5.2 ZÁVADY PŘEKLENOVACÍCH (BYPASS) DIOD.....	47
5.3 HORKÁ MÍSTA (HOT SPOTS) .....	47
5.4 ZÁVADY NA STŘÍDAČÍCH.....	48
5.5 ZTRÁTY Z DEKLAROVANÉHO NOMINÁLNÍHO VÝKONU .....	49
5.6 VÝMĚNA POŠKOZENÝCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ .....	49



<b>6</b>	<b>SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ NAD ČESKOU REPUBLIKOU .....</b>	<b>50</b>
6.1	TEPLOTNÍ KOEFICIENT VÝKONU .....	51
6.2	ORIENTACE FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ .....	52
6.3	SIMULACE ELEKTRÁRNY S PROGRAMEM PVGIS .....	52
<b>7</b>	<b>STATISTICKÝ PRŮZKUM .....</b>	<b>56</b>
7.1	FORMA PRŮZKUMU.....	56
7.2	VYHODNOCENÍ PRŮZKUMU .....	56
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>66</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Vývoj cen fotovoltaických panelů. [5] .....	13
1.2 Rozdělení kategorií FVE podle instalovaného výkonu. ....	16
1.3 Rozdělení instalovaného výkonu v elektrizační soustavě ČR. ....	16
1.4 Rozdělení instalovaného výkonu z obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě ČR. ....	17
1.5 Rozdíl instalovaného výkonu z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě ČR. ....	17
1.6 Výkon solárních elektráren v MWp rozdělený podle jednotlivých krajů. ....	18
2.1 Znázornění pohlcovaného světla při průchodu atmosférou. [13] .....	21
2.2 Poměr přímého a difúzního záření na území ČR. [14] .....	22
2.3 Způsoby využití solárního záření. ....	23
2.4 Princip činnosti fotovoltaického článku. [16] .....	26
2.5 Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku. [16] .....	27
2.6 Polykrystalický ingot křemíku. [16] .....	28
2.7 Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku. [15] .....	28
2.8 Pohled do kelímku z křemenného skla s vytvářejícím se krystalem. [15] .....	29
2.9 Monokrystalický ingot (nahore) a jeho následné nařezání na destičky (dole). [15] .....	30
2.10 Solární panel tvořený amorfním křemíkem. [17] .....	31
3.1 Průřez fotovoltaickým panelem. [20] .....	33
4.1 Obecné schéma fotovoltaického zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí. ....	40
4.2 Detail fotovoltaického pole. ....	41
4.3 Střídač společnosti ABB s maximálním výkonem 1 MW a účinností 98,8 %. [27] .....	42
4.4 Schéma zapojení ostrovního systému s elektrocentrálou. ....	43
4.5 Gelový akumulátor Victron Energy pro ostrovní systém. [28] .....	44
4.6 Regulátor Morningstar - Tristar MPPT 60A. [30] .....	44
4.7 Střídač napětí EasySolar s funkcí regulátoru. [31] .....	45
5.1 Nesprávně vedená kabeláž. ....	46
5.2 Propojení fotovoltaického panelu a překlenovací diody. ....	47
5.3 Výsledek diagnostiky horkých míst s pomocí termovize. [35] .....	48
6.1 Mapa trvání slunečního svitu na území České republiky. [38] .....	50
6.2 Roční úhrn globálního slunečního záření na území České republiky ve W/m <sup>2</sup> . [38] .....	51
6.3 Teplotní závislost fotovoltaického článku. [32] .....	52
6.4 Úvodní obrazovka programu PVGIS. ....	53

6.5 Závislost průměrné měsíční produkce na měsíci [kWh/měsíc] (vlevo) a závislost průměrného měsíční záření dopadající na moduly instalovaného systému [kWh/m <sup>2</sup> /měsíc] (vpravo). .....	55
6.6 Silueta horizontu a sluneční cesta pro zimní a letní slunovrat. ....	55
7.1 Rozdělení typů panelů podle celkového počtu a podle instalovaného výkonu. ....	57
7.2 Faktory jež rozhodly o výběru panelů. ....	58
7.3 Porovnání prostorového využití pohyblivé elektrárny (vlevo) a statické (vlevo). ....	59
7.4 Postup při určování orientace fotovoltaické elektrárny. ....	60
7.5 Výběr firem nabízející ekologickou recyklaci fotovoltaických panelů. ....	62

## SEZNAM TABULEK

1.1 Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren v ČR. [6] .....	14
1.2 Vývoj výkupních cen fotovoltaické energie. [8] .....	15
2.1 Podíl technologií na trhu. ....	31
3.1 Fotovoltaické panely s největším výkonem a účinností na trhu v lednu 2017. [18] .....	34
3.2 Dotazník Solární asociace: Rekonstrukce zařízení. ....	35
3.3 Dotazník Solární asociace: Pokračování v provozu. ....	35
3.4 Materiálové složení krystalických panelů. ....	35
3.5 Materiálové složení tenkovrstvých panelů. ....	36
3.6 Množství instalovaných fotovoltaických panelů. ....	38
5.1 Nejčastější ztráty z deklarovaného nominálního výkonu. ....	49
6.1 Očekávané hodnoty produkce a záření pro elektrárnu FVE Brno – Letiště Tuřany. ....	54
7.1 Důvody nefunkčnosti fotovoltaických elektráren. ....	61
7.2 Statistika poruch fotovoltaických panelů. ....	62

# ÚVOD

Cílem práce je nejen provést teoretický rozbor problematiky současné fotovoltaiky, ale také zjistit závažné praktické okolnosti spojené s provozem fotovoltaických elektráren v České republice, včetně ekologických aspektů souvisejících s platnou legislativou. S ohledem na nutnost kontaktovat přímo vlastníky fotovoltaických elektráren je práce zaměřena na oblast jižní Moravy, kde je dostatečná koncentrace, a tudíž i předpoklad získání věrohodných dat pro získání využitelných informací. Práce je členěna do sedmi kapitol, z nichž za stěžejní lze považovat právě statistický průzkum.

První kapitola je koncipována jako rešerše fotovoltaiky v České republice. Krátce popisuje vznik a historii fotovoltaických elektráren. Dále se v této kapitole nachází vysvětlení obrovského rozmachu fotovoltaických elektráren, který v České republice nastal mezi lety 2009 a 2010. Poslední část této kapitoly se věnuje samotným fotovoltaickým elektrárnám. Je v ní popsáno složení celkového instalovaného výkonu, postavení fotovoltaických elektráren v porovnání s ostatními zdroji elektrické energie a rozdělení instalovaného fotovoltaického výkonu do jednotlivých krajů. Nakonec jsou okrajově popsány největší fotovoltaické elektrárny v České republice.

Druhá kapitola se věnuje principům činnosti samotných fotovoltaických článků. Je popsán zdroj slunečního záření a způsoby pasivního využití sluneční energie. Dále je popsán fotoelektrický a fotovoltaický jev a princip funkce fotovoltaického článku. Dále jsou popsány tři základní druhy fotovoltaických článků. Polykrystalický, monokrystalický a články z amorfního křemíku.

Třetí kapitole již popisuje samotné fotovoltaické panely, jejich životnost, materiálové složení a konečnou recyklaci. Velmi důležitá část, která se věnuje recyklaci je rozdělena na dvě části, a to ekonomické hledisko recyklace a následně samotné recyklační metody.

Ve čtvrté části této práce jsou popsány jak principy klasické fotovoltaické elektrárny, a i když se jim tato práce příliš nevěnuje, tak i elektrárny ostrovní.

Následující pátá kapitola je jedna ze stěžejních a popisuje typy závad, které se, na základě vlastního průzkumu, na elektrárnách nejčastěji vyskytují. Ze získaných údajů lze usuzovat, které komponenty jsou závažné pro likvidaci a stanovit tak ekologické podmínky pro vykazování nakládání s odpady.

Šestá kapitola se věnuje slunečnímu záření nad Českou republikou. V této kapitole je popsáno, která místa u nás jsou nejvhodnější pro stavbu fotovoltaické elektrárny z hlediska slunečního záření. Ukazuje mapy ročního úhrnu globálního záření a mapy slunečního svitu. Dále popisuje princip teplotního koeficientu výkonu, tedy vysvětlení ztráty výkonu fotovoltaických elektráren při vysokých letních teplotách. Nakonec je popsán simulační program PVGIS, který patří k nejpoužívanějším programům pro simulaci fotovoltaických elektráren. Pro znázornění funkce je provedena simulace elektrárny FVE Brno – Letiště Tuřany, tedy fotovoltaické elektrárny v okrese Brno-město.

Poslední, nejdůležitější, kapitola se již věnuje samotnému statistickému průzkumu. V této kapitole je popsána forma průzkumu a je vyhodnoceno celkem sedm otázek na které odpovídali samotní provozovatelé fotovoltaických elektráren.

# 1 REŠERŠE

## 1.1 Vznik a historie fotovoltaických elektráren

Historie fotovoltaiky začíná objevením fotoelektrického jevu, který byl prezentován v roce 1839 Alexandrem Edmondem Becquerelem, a později objevením fotoelektrického jevu Heinrichem Hertzem v roce 1887. Tyto jevy však nebylo možné vysvětlit pomocí vlnové teorie světla. Fyzikální princip fotoelektrického jevu byl teoreticky popsán Albertem Einsteinem v roce 1905. Za tuto teorii mu byla v roce 1921 udělena Nobelova cena za fyziku.

V roce 1940 byl Russellem Shoemakerem Ohlem, prakticky náhodou, vyroben PN přechod na křemíku a bylo zjištěno, že při osvětlení vyrábí proud. Tento objev byl patentován v roce 1946 (US Patent 2402662) [1] a jeho účinnost tohoto článku byla přibližně 1 %. První fotovoltaický článek, který byl použitelný pro výrobu elektřiny, byl vyroben v roce 1954 v Bellových laboratořích. Jednalo se o článek z monokrystalického křemíku, který měl účinnost kolem 6 %. Jako zdroj elektřiny se začaly fotovoltaické články používat již od roku 1958 na kosmických družicích, kde je fotovoltaika k napájení spotřebičů používána dodnes. Celkový instalovaný výkon fotovoltaických panelů na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS) je 110 kWp. Větší zájem o fotovoltaiku jako zdroj energie v pozemských podmínkách byl, stejně jako u ostatních obnovitelných zdrojů, vyvolán ropnými krizemi v 70. letech minulého století. Od té doby probíhá intenzivní výzkum a vývoj, v jehož důsledku roste účinnost, klesá cena a zvyšuje se životnost fotovoltaických článků a panelů. Zároveň se snížila energetická náročnost výroby natolik, že panel za dobu svého života vyprodukuje mnohonásobně více energie, než se spotřebovalo na jeho výrobu [2]. Skutečného rozšíření se však fotovoltaika dočkala teprve se zavedením různých systémů podpory. Prvním byl dotační program v Japonsku následovaný systémem výkupních cen v Německu.

Nejstarší větší pozemní instalací je solární park postavený firmou Arco Solar v mohavské poušti v Kalifornii se špičkovým výkonem 1 MWp z roku 1982. První solární elektrárnou v ČR je potom fotovoltaická elektrárna Dukovany (původně Mravenečník) osazena monokrystalickými panely, postavena mezi lety 1995 a 1998 se špičkovým výkonem 10 kWp. Délka výstavby byla ovlivněna především nepříznivými klimatickými podmínkami, jelikož komplex ležel v Jeseníkách (nedaleko přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně) v nadmořské výšce 1160 m. Do provozu byla spuštěna v říjnu 1998 a její provoz byl ukončen v říjnu 2002, kdy byla přestěhována do Dukovan. Úlohou této první elektrárny však byl především výzkum a ověřování. Provoz elektrárny byl velmi problematický, a to především poruchovostí proudových měničů. [3]

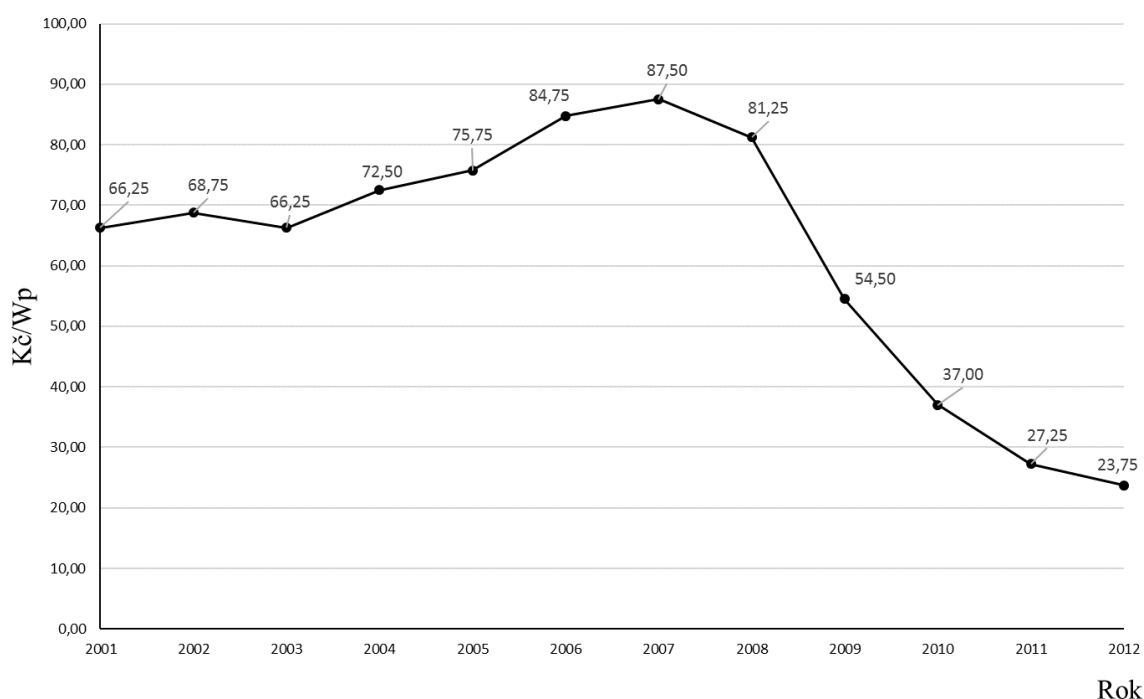
## 1.2 Příčiny solárního boomu v České republice

Česká republika se v rámci podpory obnovitelných zdrojů energie Evropské unie zavázala, že do roku 2020 bude z obnovitelných zdrojů pokrývat 13 % výroby elektrické energie. Jelikož obnovitelné zdroje nejsou bez finanční podpory rentabilní, bylo nutné vytvořit systém dotací. Pro fotovoltaické elektrárny byl však tento systém nastaven velmi nešťastně a celá situace vedla k enormnímu rozšíření solárních elektráren v zemi, která neoplývá nijak výraznou intenzitou slunečního záření v porovnání např. s jižní Evropou. Solární boom v České republice

nastartovalo v roce 2008 stanovení příliš vysokých výkupních cen elektřiny z fotovoltaických elektráren a nemožnost jejich výraznějšího snížení v následujících letech, jež by bylo nezbytnou reakcí na klesající náklady pro výstavbu elektrárny.

Fotovoltaické elektrárny jsou v České Republice podporovány od roku 2002 formou garantované výkupní ceny elektřiny. Ta byla v témže roce nastavena na 6 343 Kč/MWh. Investiční náklady se pohybovaly okolo 200 Kč/Wp. Znamenalo to tedy, že v roce 2002 byly fotovoltaické elektrárny hluboko pod hranicí rentability. Pokud chtěla Česká republika dostat závazku výroby 13 % energie z obnovitelných zdrojů do roku 2020, bylo nutné pobídnout investory. Na začátku roku 2005 vstoupil v platnost zákon č. 180/2005 Sb. [4] o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kterým Energetický regulační úřad (ERÚ) stanovil výši výkupní ceny vyplácené po 20 let od výstavby elektrárny na 15 260 Kč/MWh. Počátečním záměrem bylo garantovat návratnost investice do 15 let. Vývoj výkupních cen je v tabulce 1.2.

Součástí zákona č. 180/2005 Sb. bylo mimo stanovené výše výkupní ceny a doby jejího vyplacení také limit meziročního poklesu výkupní ceny, který činil 5 % z ceny předchozího roku. Tato součást, jež prošla až jako pozměňovací návrh, znemožnila reakci na razantní pokles nákladů na pořízení fotovoltaických panelů v letech 2009 a 2010. Pokles cen souvisel zejména s masovou produkcí fotovoltaických panelů v Číně. Vývoj cen fotovoltaických panelů je zobrazen na obrázku 1.1. To způsobilo nekontrolovatelný nárůst počtu fotovoltaických elektráren, který je zobrazen v tabulce 1.1.



Obrázek 1.1: Vývoj cen fotovoltaických panelů. [5]

Tabulka 1.1: Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren v ČR. [6]

Rok	Celkový instalovaný výkon [MWp]
2006	0,2
2007	3,4
2008	39,5
2009	464,5
2010	1959,1
2011	1971,0
2012	2086,0
2013	2132,0
2014	2067,4
2015	2074,9
2016	2047,0

V té době to znamenalo 4. největší instalovaný výkon v Evropě za Německem, Itálií a Španělskem a téměř splnění závazku vůči EU o 9 let dříve. ERÚ na nastalou situaci reagoval snížením výkupní ceny v letech 2008 a 2009 o zákonem maximálních povolených 5 %. Novela zákona upravující možnost meziročního snížení výkupní ceny o více než 5 % přišla až v roce 2011. Další novela zákona o podpoře obnovitelných zdrojů ze září 2013 úplně zastavila podporu pro fotovoltaické, bioplynové, biometanové elektrárny a elektrárny na biomasu uvedené do provozu od 1. 1. 2014 a větrné, vodní a geotermální elektrárny uvedené do provozu po 31. 12. 2014. Vývoj výkupních cen pro fotovoltaické elektrárny je v tabulce 1.2.

Dalším opatřením ERÚ byla dodatečná 26% solární daň, která pro roky 2011-2013 zpětně zdanila výnosy elektráren o instalovaném výkonu nad 30 kW postavených v letech 2009 a 2010. Vyvolala velkou vlnu protestů provozovatelů fotovoltaických elektráren, mnohými byla považována za podvod ze strany státu a vyústila v podání trestního oznámení na ERÚ. Tu podala Česká fotovoltaická asociace a Aliance pro energetickou soběstačnost, kvůli údajně zkresleným materiálům poskytnutým ze strany ERÚ Ústavnímu soudu, který o solární dani rozhodoval. Soud ovšem provozovatelům fotovoltaických elektráren nevyhověl. Po roce 2013 je výše této daně pro elektrárny uvedené do provozu v roce 2010 stanovena na 10 %.

Hlavním problémem nevhodně nastavené legislativy bylo především přehlížení fotovoltaických elektráren do roku 2008 a do jisté míry i v roce 2009. Největší pozornost byla v té době, co se týče obnovitelných zdrojů, věnována především větrným elektrárnám, jejichž podpora byla v Poslanecké sněmovně mnohem více diskutována. Fotovoltaika nebyla v té době považována za dostatečně konkurenceschopnou a ani největší optimisté nepředpokládali její větší rozmach v České Republice.

Rapidní rozšíření fotovoltaických elektráren mělo za následek navýšení ceny elektřiny pro odběratele skrze příspěvek na podporu OZE. V roce 2006 činil příspěvek na podporované zdroj energie 28 Kč/MWh, v roce 2013 dosáhl nejvyšší hodnoty 583 Kč/MWh. V následujících letech byl zmrazen na hodnotu 495 Kč/MWh s tím, že zbytek bude hrazen ze státní pokladny z financí získaných ze solární daně. V roce 2013 bylo touto formou uhrazeno 11,7 mld Kč. Energie pro průmysl se stala v Česku nejdražší v Evropě, čímž se snížila konkurenceschopnost

českých podniků. V roce 2012 66 % veškeré podpory obnovitelných zdrojů připadlo na FVE, ty přitom vyrobily pouze čtvrtinu energie všech obnovitelných zdrojů v ČR a pokryly 3 % celkové spotřeby. Důsledkem bylo ukončení podpory po roce 2014 i efektivnějších zdrojů, jako vodních elektráren a výtopen na biomasu, které by mohly být využívány na úkor FVE. [7]

Tabulka 1.2: Vývoj výkupních cen fotovoltaické energie. [8]

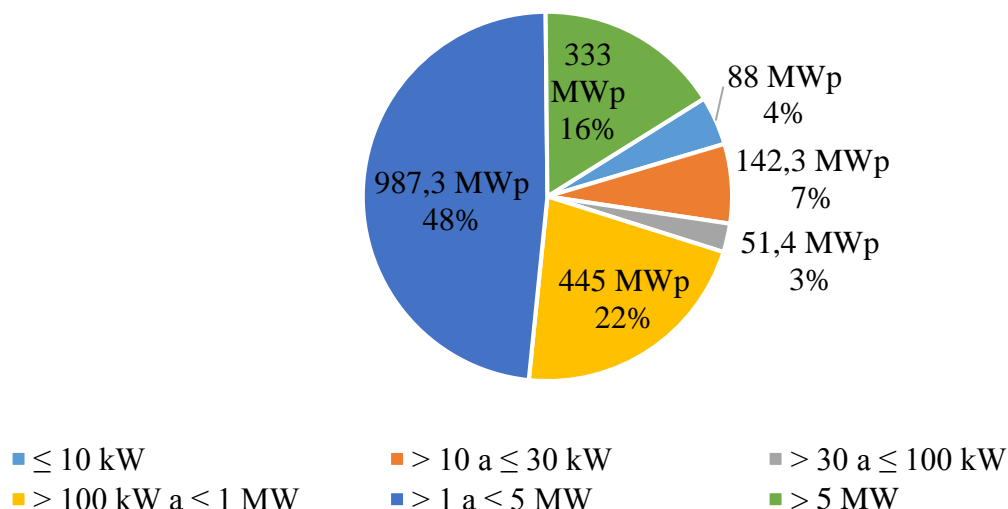
Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby [kWp]		Výkupní ceny [Kč/MWh]
od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	
-	31. 12. 2005	-	-	7 273
1. 1. 2006	31. 12. 2007	-	-	15 260
1. 1. 2008	31. 12. 2008	-	-	14 882
1. 1. 2009	31. 12. 2009	0	30	13 964
1. 1. 2009	31. 12. 2009	30	-	13 862
1. 1. 2010	31. 12. 2010	0	30	13 005
1. 1. 2010	31. 12. 2010	30	-	12 903
1. 1. 2011	31. 12. 2011	0	30	7 803
1. 1. 2011	31. 12. 2011	30	100	6 141
1. 1. 2011	31. 12. 2011	100	-	5 723
1. 1. 2012	31. 12. 2012	0	30	6 284
1. 1. 2013	30. 6. 2013	0	5	3 410
1. 1. 2013	30. 6. 2013	5	30	2 830
1. 7. 2013	31. 12. 2013	0	5	2 990
1. 7. 2013	31. 12. 2013	5	30	2 430

### 1.3 Fotovoltaické elektrárny v České republice

V současné době je celkový instalovaný výkon fotovoltaických elektráren v ČR 2047 MWp. Podíl kategorií fotovoltaických elektráren na instalovaném výkonu je zobrazen ve výšečném grafu na obrázku 1.2. Z tohoto grafu vyplývá, že největší podíl na celkovém instalovaném výkonu tvoří fotovoltaické elektrárny s celkovým instalovaným výkonem mezi 1 a 5 MWp. Tvoří tak téměř polovinu celkového instalovaného fotovoltaického výkonu v ČR. Podle seznamu fotovoltaických elektráren z 1. 9. 2012 se v této kategorii nachází přibližně 470 elektráren.



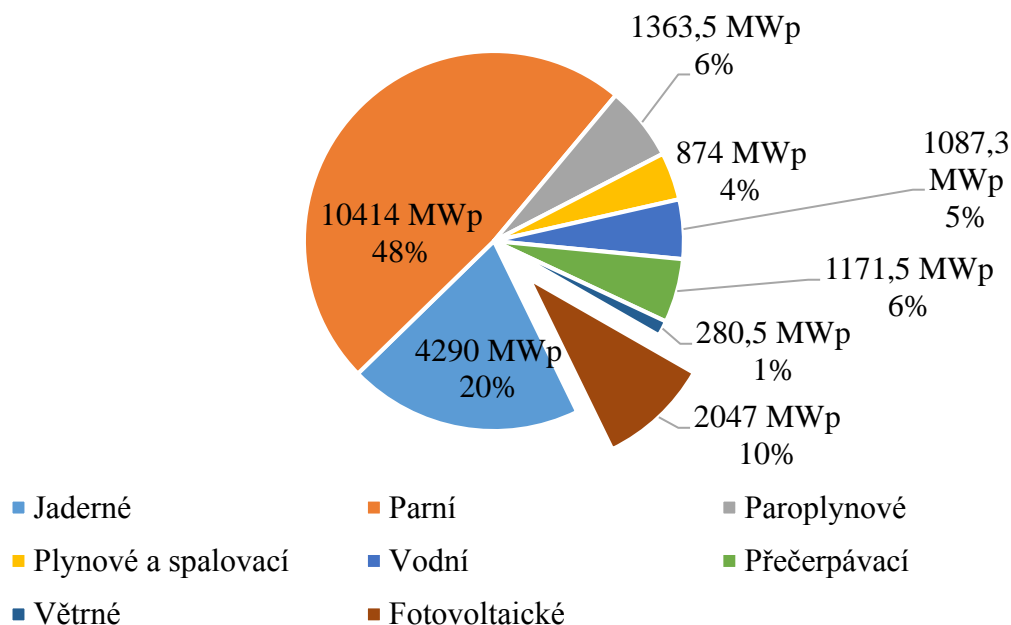
### Rozdělení kategorií FVE podle instalovaného výkonu



Obrázek 1.2: Rozdělení kategorií FVE podle instalovaného výkonu.

Ve výšečtovém grafu na obrázku 1.3 jsou zobrazeny podíly instalovaného výkonu v elektrizační soustavě v ČR. Z grafu vyplývá, že největší podíl instalovaného výkonu je tvořen elektrárnami parními. Jedná se celkem o 10,4 GWp z celkového instalovaného výkonu, který je 21,5 GWp. Z tohoto celkového instalovaného výkonu tvoří fotovoltaické elektrárny 10 %, tedy přibližně 2 GWp instalovaného výkonu.

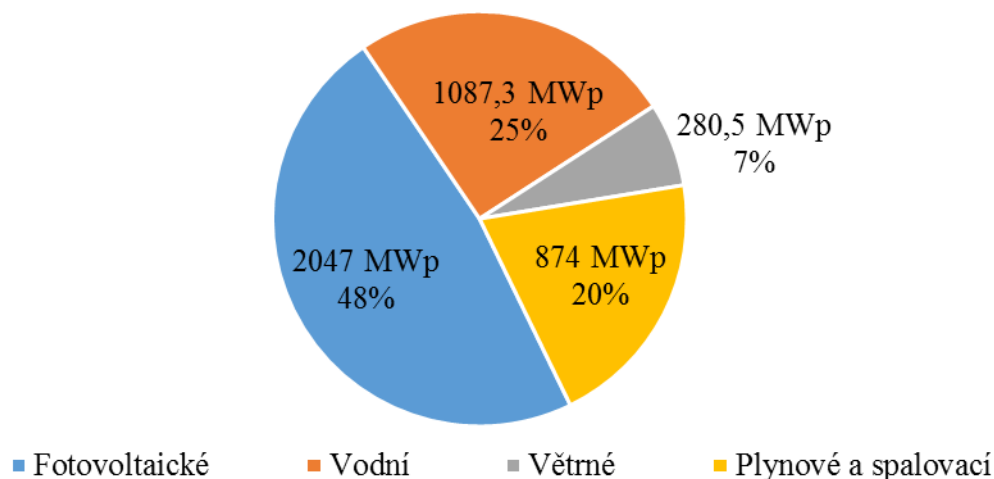
### Rozdělení instalovaného výkonu v ES ČR



Obrázek 1.3: Rozdělení instalovaného výkonu v elektrizační soustavě ČR.

Podíváme-li se na výšečový graf na obrázku 1.4, na kterém je zobrazeno rozdělení instalovaného výkonu pouze z obnovitelných zdrojů, vidíme téměř poloviční podíl fotovoltaických elektráren.

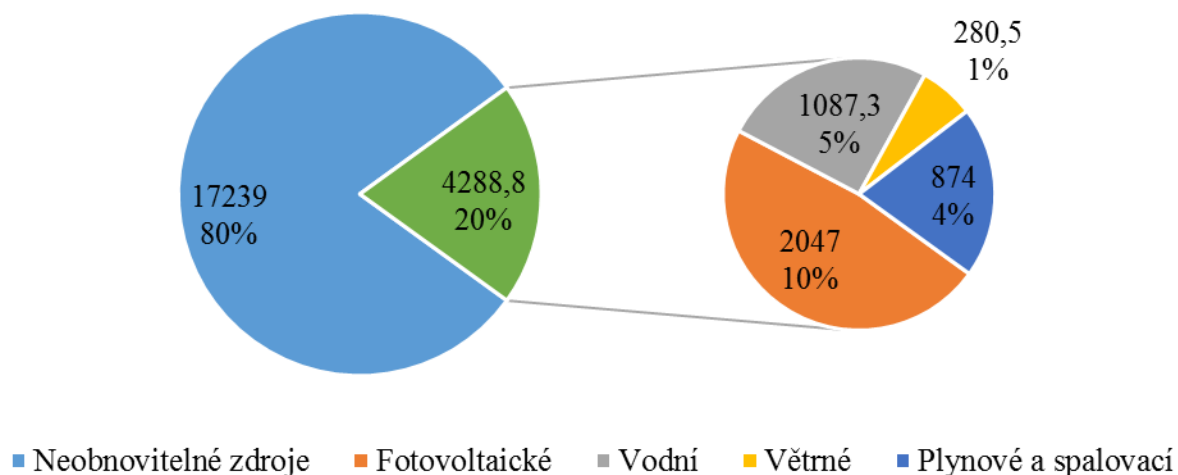
#### Rozdělení instalovaného výkonu z obnovitelných zdrojů v ES ČR



Obrázek 1.4: Rozdělení instalovaného výkonu z obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě ČR.

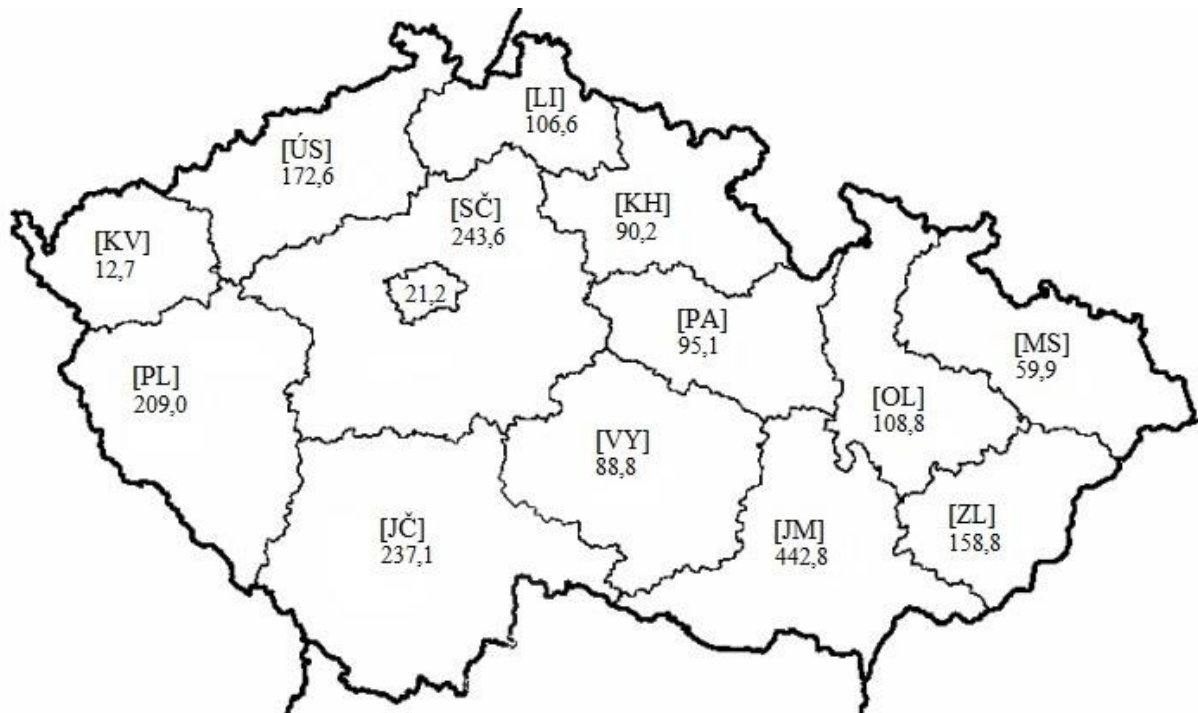
Na výšečovém grafu na obrázku 1.5 je poté zobrazen celkový instalovaný výkon v elektrizační soustavě České republiky a jeho rozdělení na zdroje neobnovitelné a obnovitelné. Z tohoto grafu je zřejmé, že Česká republika již splnila závazek vůči Evropské unii, že do roku 2020 bude z obnovitelných zdrojů pokrývat 13 % výroby elektrické energie

#### Rozdíl instalovaného výkonu z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů v ES ČR



Obrázek 1.5: Rozdíl instalovaného výkonu z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě ČR.

Na obrázku 1.6 je zobrazen výkon solárních elektráren rozdělený podle jednotlivých krajů. Výkony jsou v mapě zobrazeny jako celkový instalovaný výkon v MWp. Největší instalovaný výkon je v kraji Jihomoravském kraji a to 442,8 MWp, nejmenší pak v kraji Karlovarském a to 12,7 MWp. Zajímavostí je poté porovnání mapy trvání slunečního svitu na území České republiky na obrázku 6.1 v kapitole 6 a touto mapou. Oproti předpokladu spolu tyto mapy nejsou v korelaci. Příkladem toho, že elektrárny v České republice nebyly stavěny podle příznivosti slunečního svitu v okolí může být Ústecký kraj. Tento kraj má nejmenší dobu trvání slunečního záření u nás, přesto patří ke krajům s vyšším instalovaným výkonem. [8]



Obrázek 1.6: Výkon solárních elektráren v MWp rozdělený podle jednotlivých krajů.

### 1.3.1 Největší fotovoltaické elektrárny v ČR

Největší fotovoltaickou elektrárnou v České republice je FVE Ralsko. Ta se nachází u obce Ralsko v Libereckém kraji. Tato elektrárna, jenž je 51. největší fotovoltaickou elektrárnou na světě, zahájila provoz 29. 12. 2010. Její celkový instalovaný výkon je 55,76 MWp a je složena z polykrystalických panelů. Majitelem elektrárny je společnost ČEZ Obnovitelné zdroje s.r.o.

Druhou největší fotovoltaickou elektrárnou v České republice je FVE CZECH VEPŘEK. Tato elektrárna se nachází u obce Nová Ves ve Středočeském kraji. Její provoz byl zahájen 7. 5. 2010 a její celkový instalovaný výkon je 35,10 MWp. Ten je složený z monokrystalických panelů o celkovém počtu 186 960 ks. Majitelem této elektrárny je FVE CZECH NOVUM s.r.o.

Třetí největší fotovoltaickou elektrárnou v České republice je FVE Ševětín. Ta se nachází u obce Ševětín v Jihočeském kraji. Provoz této elektrárny byl zahájen 14. 12. 2010 a její celkový instalovaný výkon je 29,90 MWp instalovaných z polykrystalických panelů. Majitelem elektrárny je společnost ČEZ Obnovitelné zdroje s.r.o. [9]

Společnost ČEZ Obnovitelné zdroje s.r.o., která je největším vlastníkem fotovoltaických elektráren v České republice, vlastní celkem dvanáct elektráren o celkovém instalovaném výkonu 142,67 MWp. Tato společnost byla oslovena pro průzkum, kterému se věnuje kapitola 7, ovšem spolupráce byla odmítnuta.

## 2 PŘEHLED PRINCIPU ČINNOSTI A EFEKTIVITY

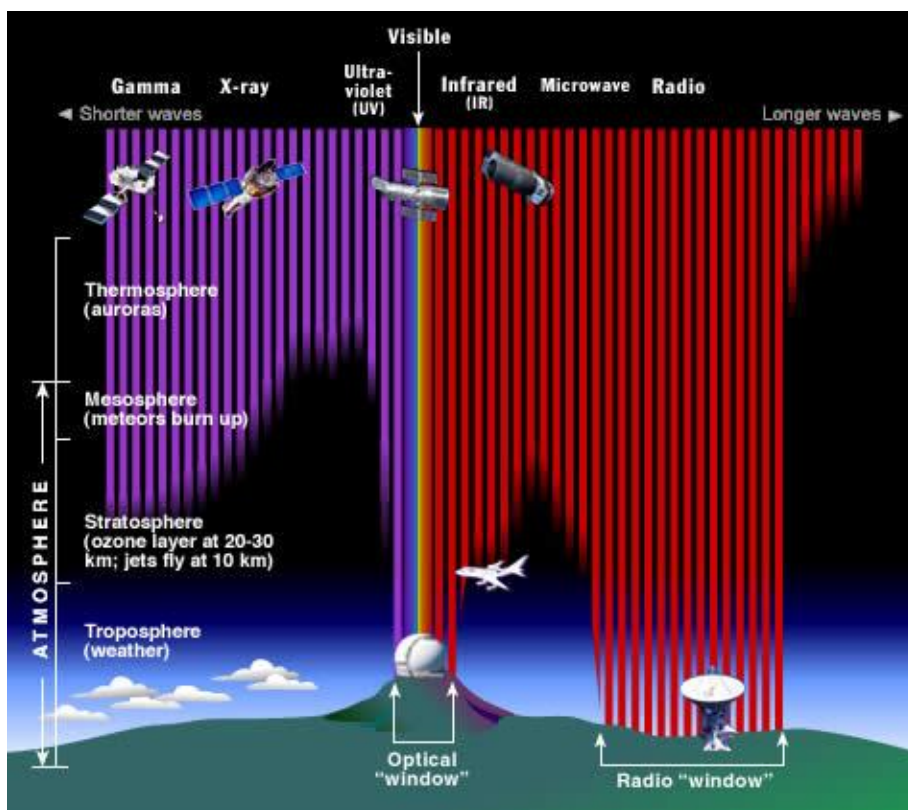
Fotovoltaika je technologie pro přímou přeměnu slunečního záření na elektřinu. Jedná se o jediný zdroj elektřiny bez pohyblivých součástí. Pojem fotovoltaika je vytvořen ze dvou slov – řeckého φώς (phós), které znamená světlo, a volt, což je jednotka elektrického napětí. Fotovoltaika je považována za trvale udržitelnou technologii, a to ze dvou důvodů. Především využívá nejdostupnější obnovitelný zdroj energie na Zemi – sluneční záření. Množství slunečního záření, které každoročně dopadne na zemský povrch, je 4000krát větší než veškerá spotřeba energie celého lidstva. Slunce přitom bude svítit ještě miliardy let. Druhý důvod je, že energie vložená do výroby fotovoltaických panelů a dalších komponent fotovoltaické elektrárny se v podmínkách České republiky vrátí zhruba za 2 roky, přičemž očekávaná životnost panelů přesahuje 30 let. [10]

### 2.1 Zdroj slunečního záření

Slunce je centrem planetární soustavy, do níž patří také naše Země. Je nám nejbližší hvězdou a ze všech hvězd je pro nás nejdůležitější. Je zdrojem veškeré energie pro naši planetu. Množství uvolněné energie lze z rozdílu hmotností vypočítat dle známého Einsteinova vztahu.

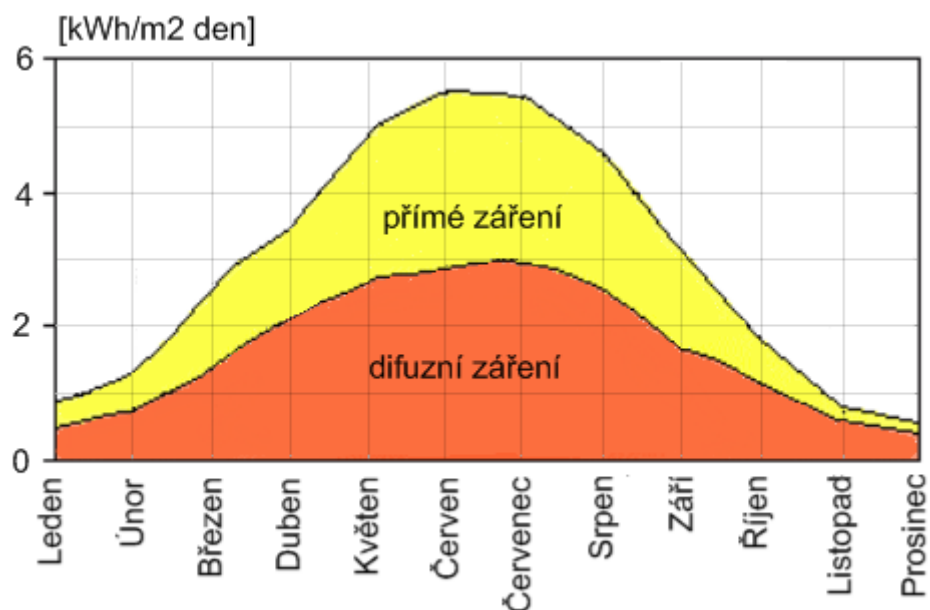
$$E = m.c^2 \quad (1)$$

V případě Slunce se jedná o slučování jader vodíku, přičemž vzniká helium a další těžší prvky. Ve slunci ubyde každou sekundu  $4,26 \cdot 10^6$  tun hmoty, což představuje uvolnění  $3,8 \cdot 10^{26}$  J. Tato energie se prostřednictvím elektromagnetického záření vyzáří do okolí hvězdy. Na zemský povrch toto záření cestuje přibližně 8 minut. Slunce vyzařuje energii jako absolutně černé těleso, tzn., že vysílá paprsky v celém rozsahu spektra od nejmenších vlnových délek  $10^{-12}$  m (záření gama, RTG a UV záření) až do největších centimetrových a metrových délek (rádiové záření). Sluneční záření na cestě k Zemi dlouhé  $150 \cdot 10^6$  km není ničím pohlcováno a přichází na hranici atmosféry Země v původní podobě, s níž opustilo Slunce. Avšak při značně zmenšené intenzitě způsobené rostoucí vzdáleností a rozptýlením na větší plochu. Z celkového výkonu, který Slunce vyzařuje, dopadne na naši Zemi jen nepatrná část, přibližně  $2 \cdot 10^{-9}$  původního výkonu, tj. asi  $172 \cdot 10^{15}$  W. [11] Z této hodnoty následně vychází solární konstanta, která udává výkon slunečního záření procházející na hranici zemské atmosféry jednotkou plochy nastavené kolmo ke slunečním paprskům. Velikost solární konstanty je  $1,373 \text{ kW/m}^2$ . Část dopadající energie je však při průchodu atmosférou pohlcena, rozptýlena či odražena a na zemský povrch tedy dopadá (v závislosti na momentálním stavu atmosféry) již méně než  $1 \text{ kW/m}^2$  při slunečním svitu a jen desítky wattů při zatažené obloze. [12] Znázornění pohlcovaného světla při průchodu atmosférou je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Znázornění pohlcovaného světla při průchodu atmosférou. [13]

Sluneční záření, jenž dopadá na zemský povrch je složeno ze dvou složek. Při jasné a bezmračné obloze dopadá největší část slunečního záření na Zemi, aniž by změnilo směr. Toto záření se nazývá přímé. Rozptylem přímého záření v mracích a na částech v atmosféře vzniká záření difúzní, které na Zemi přichází ze všech směrů. Součet intenzity přímého a intenzity difúzního slunečního záření na horizontálním zemském povrchu se nazývá globální sluneční záření. [14] Poměr přímého a difúzního záření na území ČR je znázorněn na obrázku 2.2.

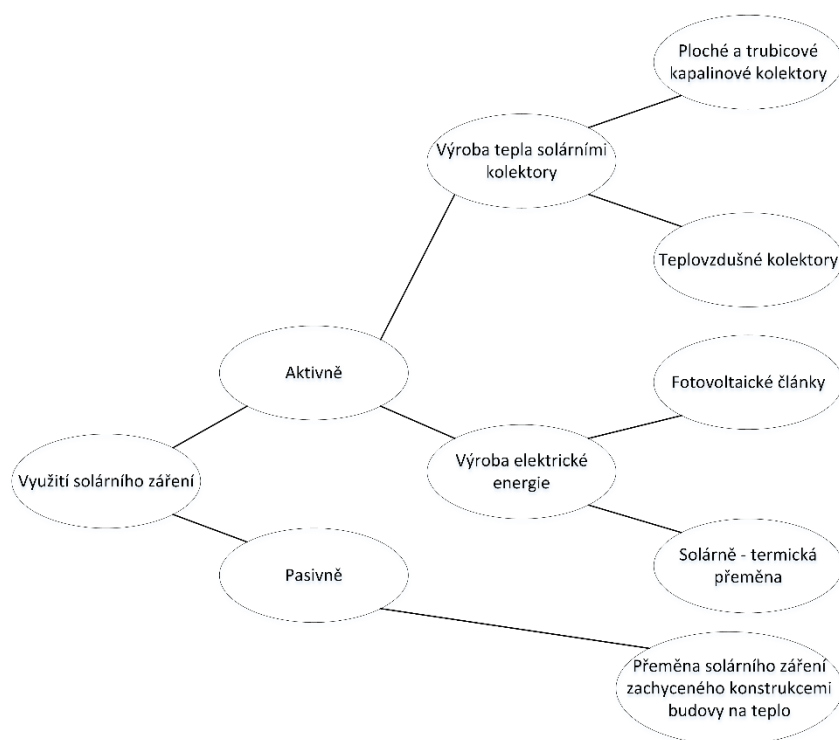


Obrázek 2.2: Poměr přímého a difúzního záření na území ČR. [14]

## 2.2 Využití sluneční energie

Způsob využití solární energie se dělí na dva typy, pasivní a aktivní. Pasivní využití solárního záření spočívá v navržení stavby tak, aby bylo efektivně využito sluneční záření, které do budovy projde skrze její prosklené části.

Aktivní využití solární energie spočívá v dodatečné instalaci dalšího systému na stávající budovu. Dělí se podle produktu, na který je solární záření přeměňováno, a to na teplo za pomoci solárních kolektorů nebo elektrickou energii. Tato práce je však především věnována výrobě elektrické energie. Přehledné rozdělení využití solárního záření je na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Způsoby využití solárního záření.

### 2.2.1 Pasivní využití sluneční energie

Každá budova může využívat tepelnou energii ze svého okolí svoji urbanistickou, architektonickou a stavebně konstrukční koncepcí. Účinnost využití slunečního záření je u odlišných budov rozdílná. Budovy, jež se v co největší míře snaží využívat sluneční energii pomocí čistě stavebních prostředků, se nazývají pasivní heliotechnické budovy [15].

Pasivní solární systémy se dělí podle dvou kritérií:

- Podle způsobu využití sluneční energie.
  - přímé (sluneční záření prochází přímo do místnosti přes zasklení)
  - nepřímé (sluneční záření se do místnosti dostává ve formě tepelné energie vyzařované z akumulací stěny)
  - hybridní
- Podle umístění v konstrukci.
  - prvky umístěné v obvodových stěnách orientovaných na jih
  - střešní prvky
  - přídavné prvky



Zásady pro navrhování pasivních solárních systému jsou poté následující:

- Na severní nebo návětrnou stranu neumistujeme okna (případně pouze malá).
- Situace oken a jiných prvků pasivních solárních systému na jižní stranu.
- Minimální členění budovy.
- Vhodné stínění listnatými stromy z důvodu přehřívání interiéru v letním období.

Typy pasivních solárních systémů:

- Akumulační solární stěny
- Nezasklený solární vzduchový kolektor
- Energetická fasáda
- Dvojitě transparentní fasády
- Energetická střecha
- Transparentní tepelná izolace

## 2.3 Fotoelektrický jev

Během tohoto fyzikálního jevu dochází následkem absorpce elektromagnetického záření (rentgenové záření, viditelné světlo) k uvolňování elektronů z látky. Uvolněné elektrony se pak dále nazývají fotoelektrony, přičemž celý tento proces se nazývá fotoemise.

Pro krátké vlnové délky je počet uvolňovaných fotoelektronů úměrný intenzitě vlnění. Neovlivňuje však energii takto uvolněných fotoelektronů, ta je závislá na frekvenci dopadajícího záření. Bylo dokázáno, že frekvence dopadajícího záření musí mít tzv. mezní kmitočet  $f_0$ , jinak se fotoemise neobjeví. Tato mezní frekvence je charakteristickou vlastností každé ozařované látky. Pokud je frekvence  $f$  dopadajícího záření vyšší než tato mezní frekvence, dochází k fotoemisi, jejíž maximální energie je charakterizována vzorcem

$$E_{\max} = h(f - f_0) \quad (2)$$

kde:

$E_{\max}$  – maximální emitovaná energie fotoelektronů

$f$  – frekvence dopadajícího záření

$f_0$  – mezní kmitočet

$h$  – Planckova konstanta ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s)

## 2.4 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev vzniká v polovodičích, pokud foton s dostatečnou energií uvolní elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního. Ve valenčním pásu zůstane pouze tzv. díra, kterou lze považovat za kladný elementární náboj. Zjednodušeně lze prohlásit, že dopadem fotonu se vytvoří pár pohyblivých nábojů elektron – díra. Tyto náboje se difúzí nebo působením elektrického pole v okolí PN přechodu pohybují ve směru k elektrodě se stejnou polaritou

(elektron k záporné elektrodě a díra ke kladné). Při propojení elektrod k vnějšímu obvodu putují elektrony k opačné elektrodě, kde rekombinují s dírami a vnějším obvodem prochází elektrický proud – PN přechod se stává zdrojem.

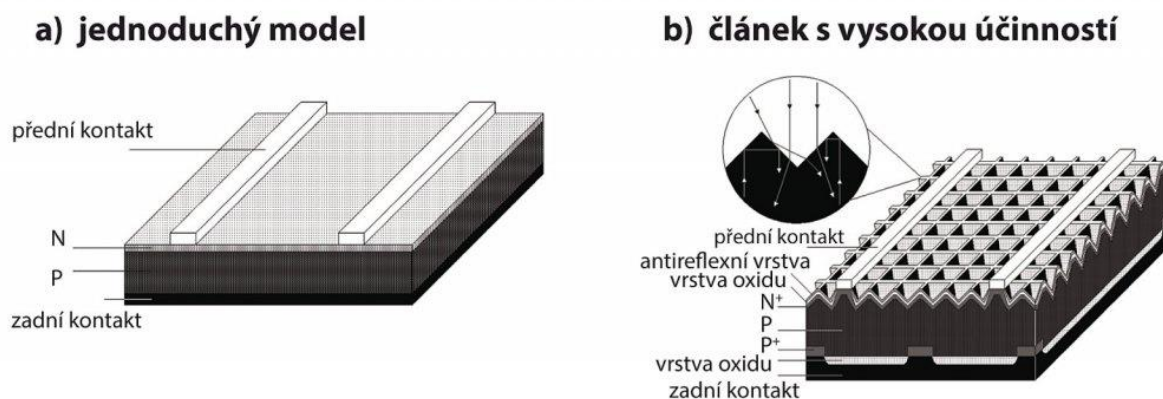
## 2.5 Princip funkce fotovoltaického článku

Jak již bylo řečeno hlavní surovinou pro výrobu fotovoltaického článku je křemík, který je v zemské kůře zastoupen přibližně 27 %, čím se stal druhým nejrozšířenějším prvkem. I to je důvod, proč je relativně levný. Je snadno dostupný, není jedovatý a je nejpoužívanějším a asi i nejlépe prozkoumaným polovodičem. V přírodě se vyskytuje většinou ve formě křemene neboli oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, kde dochází k celému řetězci chemických reakcí. Pokud započítáme pouze výchozí a konečné produkty, můžeme zjednodušeně vše vyjádřit jedinou rovnicí.



Do obloukové pece se shora kontinuálně dopravují suroviny, kde je následně písek promíchaný s mletým karbonizovaným uhlím (koksem). Směrem dolů stoupá teplota a v jednotlivých úrovních probíhají chemické reakce. Dole v zóně s teplotou přibližně 2 000 °C se hromadí roztavený křemík, který se v pravidelných intervalech odlévá. Takto získaný surový křemík hutní kvality má čistotu až 99 %, zhruba 1 % nečistot tvoří především příměsi železa (Fe), hliníku (Al) a uhlíku (C). Pro použití v polovodičové výrobě je však potřebná čistota o několik řádů vyšší. Proto je třeba surový křemík vyčistit a poté vytvořit finální polotovary pro použití v další polovodičové výrobě. K tomu účelu existují různé technologie. Příkladem jedné z nich je převod na kapalnou fázi a její destilace, kterou lze získat polotovary až čistoty tzv. ppb (particles per bilion – nečistoty řádově  $10^{-9}$ ), která je potřebná pro výrobu integrovaných obvodů a mikroprocesorů. Pro výrobu fotovoltaických článků běžně postačuje i nižší čistota, ale lepší než čistota ppm (particles per milion – nečistoty řádově  $10^{-6}$ ).

Fotovoltaický článek je ve své podstatě velkoplošnou diodou s přechodem PN, který je orientovaný kolmo k čelní ploše. Na přední straně fotovoltaického článku je poté vytvořena antireflexní úprava povrchu kvůli minimalizaci odrazu, z důvodu maximálního využití dopadajícího záření. Články s nejvyšší účinností se tedy na první pohled jeví jako černé. Přední kontakt bývá vytvořen ve tvaru mřížky či hřebínku, aby zakrýval co nejmenší část plochy a aby světlo mohlo dopadat na co největší plochu článku. Zadní kontakt bývá u standardních panelů celoplošný. Kontakty se nanášejí na standardní články nejčastěji sítotiskem. Standardní, zjednodušený model fotovoltaického článku je znázorněn na obrázku 2.4. Alternativou jsou speciální články pro systémy s vysokou koncentrací záření, u kterých se vyrábí kontakty vnořené do materiálu polovodiče. Tím vznikne větší plocha mezi kontaktem a polovodičem a dovolí průtok vyšších proudových hustot. [16]



Obrázek 2.4: Princip činnosti fotovoltaického článku. [16]

Takto konstruovaný článek sice funguje podle výše popsaného principu, ale má nižší účinnost fotovoltaické přeměny energie hlavně v důsledku rekombinačních ztrát. Antireflexní vrstva na přední straně minimalizuje odraz, aby maximum fotonů vniklo do PV článku a proniklo až do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu chemicky pasivují povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a jen zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do PV článku. Pokud ale projdou, aniž vyvolají fotovoltaickou přeměnu a odrazí se od zadní elektrody, nemohou na přední straně vystoupit ven z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět, jak je znázorněno v detailu obrázku 2.4b.

Při dopadu fotonu ze slunečního záření na vysoce dotovaný polovodič typu N dojde k přenosu jeho energie na elektron ve valenční sféře některého z atomů křemíku. Sluneční paprsky (fotony) dopadem na křemíkový modul fotovoltaického panelu rozkmitají elektrony v PN přechodové vrstvě a elektrony přecházejí z vrstvy s jejich majoritním počtem do vrstvy, kde jejich počet bude minoritní. V důsledku toho se objeví na PN přechodu elektrického pole, které odděluje elektrony a díry vzniklé absorpcí fotonu. Elektrony usměrní do N-polovodiče a díry do P-polovodiče. Vzájemným působením slunečního záření a hmoty dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektronů. V polovodiči pak vznikají volné elektrické náboje, elektron-díra, které jsou už jako elektrická energie dováděny ze solárního článku přes regulátor dobíjení do akumulátoru, ke spotřebiči nebo přes měnič do sítě. Velikost vyrobeného výkonu je přímo úměrná množství dopadajícího světla a účinnosti článků. Díky tomuto principu je fotovoltaika pokládána a nejčistší zdroj energie. [16]

## 2.6 Články tvořené polykrystalickým křemíkem

Polykrystalický křemík, který se využívá především pro menší výkony, má výhodu poměrně dobré účinnosti (16–18 %). Nižší účinnost je způsobena především ztrátami na přechodu mezi jednotlivými krystalovými zrny. Tato nedokonalost však způsobuje, že polykrystalický článek má dobrou účinnost i při nižších hladinách osvětlení a při osvětlení ze strany. Je tedy vhodný

pro nepohyblivé instalace. Cena těchto článků je nižší než u článků polykrystalických. Polykrystalický článek je na obrázku 2.5.

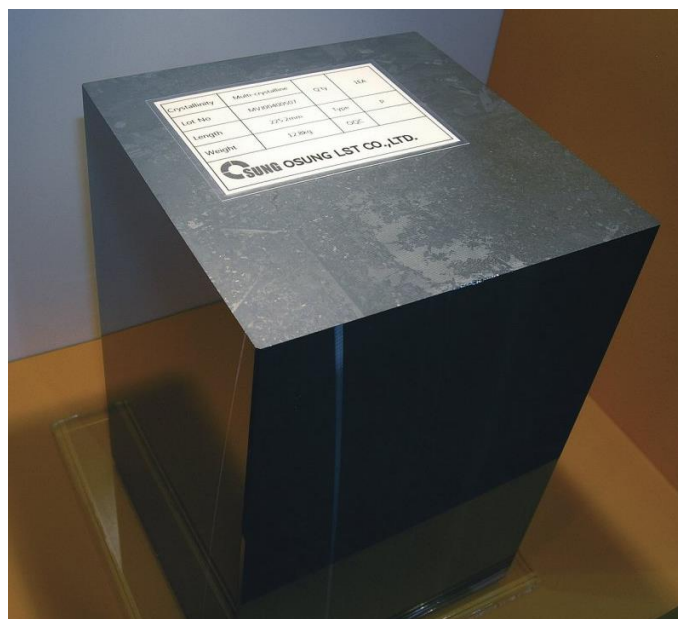


Obrázek 2.5: Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku. [16]

### 2.6.1 Výroba polykrystalického článku

Metoda výroby polykrystalického křemíku je jednodušší, a tudíž levnější než výroba monokrystalického křemíku. Polykrystalický křemík může být vyroben různými způsoby. Nejčastěji, komerčně využívané, metody jsou založeny na procesu, během kterého se roztavený křemík odlévá do formy a nechá ztuhnout. Výsledkem je polykrystalický ingot křemíku. Jedním z důležitých faktorů, jenž ovlivňuje výslednou velikost krystalů a šíření nečistot je rychlost chlazení. Chlazení musí být pomalé a řízené induktivním ohřevem, aby se vytvořila co možná největší monokrystalická zrna a aby bylo v materiálu minimum dislokací, pnutí atd. Hranice zrn i další poruchy krystalu totiž tvoří pro elektrony potenciálové bariéry a je tedy žádoucí jejich přítomnost minimalizovat.

Forma, do které se roztavený křemík odlévá, je obvykle krychlového tvaru z důvodu následného krájení na čtvercové články. Čtvercové články na sebe lépe prostorově navazují, a tak nevytváří na panelech zbytečné nevyužitě místo. Polykrystalický ingot křemíku je na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Polykrystalický ingot křemíku. [16]

## 2.7 Články tvořené monokrystalickým křemíkem

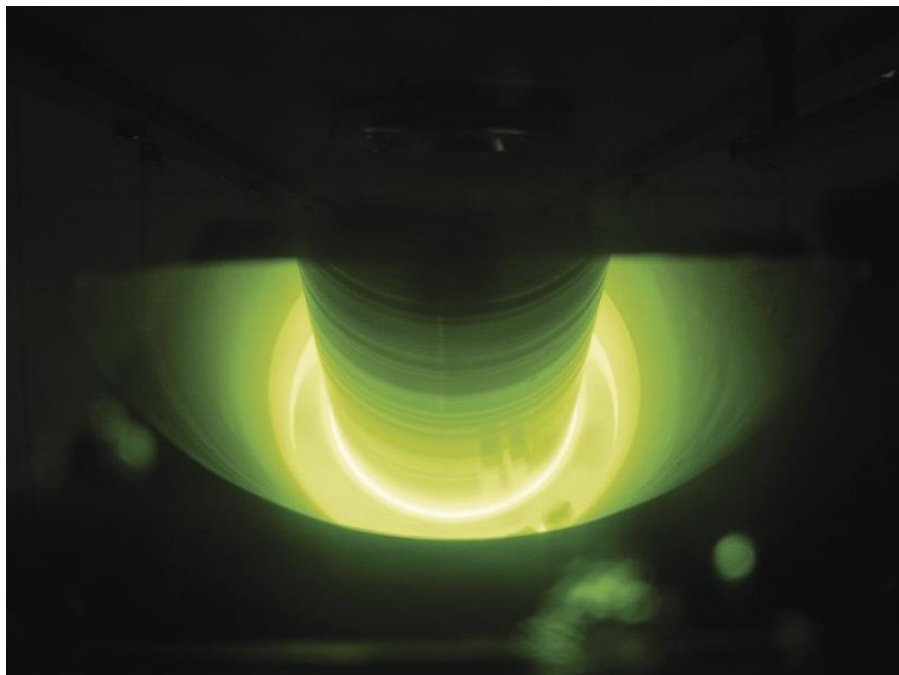
Jedná se o nejstarší technologii výroby fotovoltaického článku. Monokrystalický křemík dosahuje při dostatečném osvětlení účinnost vyšší (14–18 %) v porovnání s polykrystalickými články. Monokrystalický článek má tvar osmiúhelníku což plyne z výrobního procesu a snahy o maximální výtěžnost. Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku je na obrázku 2.7. Výroba velkých krystalů čistého křemíku je však obtížná a z energetického hlediska náročná. Z toho vyplývá i jedna z nevýhod tohoto článku a tou je cena. Další nevýhodou je v porovnání s polykrystalický teplotní koeficient výkonu. Tomuto parametru se věnuje kapitola 6.1.



Obrázek 2.7: Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku. [15]

### 2.7.1 Výroba monokrystalického článku

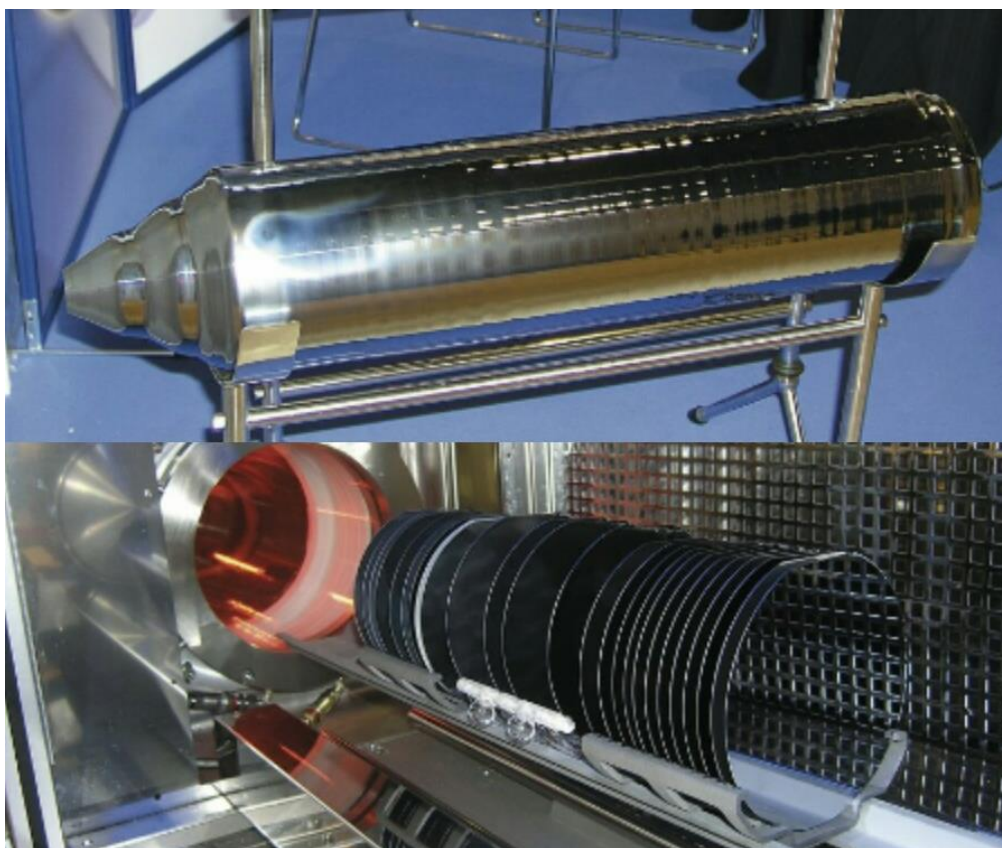
Výroba monokrystalických ingotů probíhá tzv. Czochralského metodou. Do taveniny o teplotě cca 1 415 °C v grafitovém kelímku se ponoří malý monokrystalický zárodek. Ten se velmi pomalu z taveniny vytahuje, a přitom se nechává otáčet kolem podélné osy. Celý proces probíhá v inertní atmosféře argonu za sníženého tlaku 400 mBar. Detail tohoto procesu je na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Pohled do kelímku z křemenného skla s vytvářejícím se krystalem. [15]

Vzniklý monokrystalický či polykrystalický ingot se nakonec příčně řeže na destičky, které tvoří základ fotovoltaických článků. V technologii řezání došlo v posledních letech k významnému posunu kvality, zejména drátové řezačky byly podstatně vylepšeny. Zatímco dříve technologie umožňovala řezat destičky o minimální tloušťce 0,3 mm, dnes je to až 0,1 mm. Ve stejném poměru se zmenšil i prořez. Úspora křemíku, energie potřebné k jeho výrobě i zefektivnění výroby je tak evidentní. Monokrystalický ingot před a po nařezání je na obrázku 2.9.





Obrázek 2.9: Monokrystalický ingot (nahore) a jeho následné nařezání na destičky (dole). [15]

## 2.8 Články tvořené amorfním křemíkem

Odlišnost od předchozích článků začíná již při jejich výrobě, kdy jsou tyto beztvare články vyráběny nanášením slabé vrstvy křemíku na skleněný obal nebo fólii. Nevýhodou je menší účinnost (8–9 %) a tudíž pro dosažení požadovaného výkonu je nutná cca 2,5krát větší plocha. Výhodou však je, že jsou tyto články schopny absorbovat tzv. difuzní záření, které vzniká tříštěním přímého slunečního záření v mracích o částice v atmosféře, takže v celkové roční bilanci mají účinnost vyšší až o 10 %. Tento typ slunečního záření v České republice převládá. Amorfni panely jsou také charakteristické příznivými teplotními koeficienty, které mají významný dopad na jejich účinnost. Rozdíl je zejména patrný ve srovnání s klasickými krystalickými moduly. V letních měsících za vyšších teplot nedochází ke snížení účinnosti amorfních modulů v takovém rozsahu jako u polykrystalické nebo monokrystalické technologie. [17] Příklad solárního panelu tvořeného amorfním křemíkem je na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: Solární panel tvořený amorfním křemíkem. [17]

## 2.9 Podíl technologií na trhu

Na základě dat z roku 2015 bylo zjištěno, že naprostou dominanci na trhu zaujímají panely krystalické. Rozdělení trhu z pohledu technologie výroby panelů je v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Podíl technologií na trhu.

Technologie článku	Podíl na trhu [%]
Krystalické technologie	93
- Články polykrystalické	68
- Články monokrystalické	25
Tenkovrstvé technologie	7
- Telurid kadmia (CdTe)	4,5
- Copper Indium Gallium DiSelenide (CIGS)	1,9
- Amorfni křemík (a-Si)	0,6

Obecně se krystalické technologie nejvíce používají na větší instalace, nejčastěji fotovoltaická pole. Tenkovrstvé technologie se zase staly oblíbenými u ostrovních systémů a u malých instalací do 5 kWp s částečně vlastní spotřebou. [18]



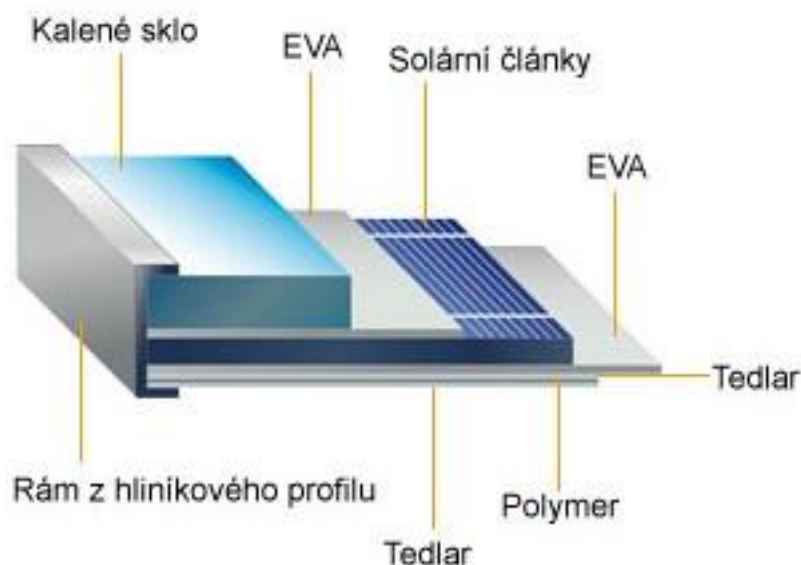
## 3 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

Životnost fotovoltaických panelů je odhadována na minimálně 20 let, jak však ukazují panely testované po pěti až deseti letech provozu, mohla by dosáhnout i dvojnásobku. Fotovoltaické panely jsou přitom zdrojem cenných surovin. Přestože fotovoltaické panely nespadají pod působnost evropské direktivy o odpadech, spadá recyklace fotovoltaických panelů pod Evropskou směrnici 2012/19/EU a pod novelu zákona 185/2001 Sb. z roku 2012.

### 3.1 Fotovoltaický panel

Sérioparalelním propojením solárních článků vzniká po jejich zapouzdření fotovoltaický panel. Panel musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, dostatečnou mechanickou a klimatickou odolnost (např. vůči silnému větru, krupobití, mrazu apod.). Krystalické články mývají obvykle výkon okolo 4 W a napětí 0,5 V. Ty se skládají z jednotlivých článků, které jsou zapojeny sérioparalelně do několika větví tak, že katoda je vždy spojena s anodou článku dalšího. Spojení probíhá pájením v plně automatickém procesu. Začátek a konec větve je vyveden ven z modulu. Fotovoltaické články jsou v několika řadách naskládány vedle sebe a poté zalaminovány do vrstvy etylenvinylacetátu (EVA), která zajišťuje ochranu před povětrnostními a mechanickými vlivy a zároveň články elektricky izoluje. Vzniká obdélníkový tvar, který se tepelně vytvrdí. EVA je však také organickým materiálem, který může vykazovat při silném ozáření UV světlem efekt žloutnutí, a tedy snížení optické transparentnosti s nepříznivým vlivem na množství generovaného elektrického výkonu slunečními články. Aplikace této vrstvy probíhá za působení vysokých teplot ve vakuu. Nejnovější články mají antireflexní vrstvu, která snižuje ztrátu světla odrazem a zvedne tak účinnost o několik procent. Následuje vložení mezi kalené sklo z přední strany a kombinaci fluoropolymeru (tedlar) a polymeru na straně zadní. Vhodné je kalené sklo se sníženým obsahem železa, které má lepší propustnost pro světlo v oblasti červeného a infračerveného záření. Zadní strana pak chrání před vodními parami a je odolná proti UV záření. Takto vzniklé moduly jsou opatřeny hliníkovým rámem pro zpevnění celé konstrukce, ochranou skla před poškozením a usnadnění realizace uchycení panelů ke konstrukci fotovoltaického systému. Vyrábí se ovšem i moduly bezrámové. Solární panely jsou následně opatřeny svorkovnicí. Ta je vyrobena z materiálu, který dokáže odolávat jak vysokým teplotám, tak i atmosférickým vlivům. Svorkovnice obsahuje překlenovací (bypass) diody a přípojovací kabely s konektory, díky kterým lze propojit několik modulů za sebe. Běžný panel má výkon v rozmezí od 100 Wp do 300 Wp. Průřez fotovoltaickým panelem je na obrázku 3.1

Fotovoltaické solární panely, lze dělit na různé typy nejen podle toho, zda jsou jejich fotočlánky polykrystalické, nebo monokrystalické. Důležitým parametrem je také výstupní napětí fotovoltaického panelu, které se odvíjí od vnitřního zapojení fotočlánků v solárním panelu. Výstupní napětí fotovoltaických panelů je samozřejmě stejnosměrné. Nejběžnějším nominálním výstupním napětím fotovoltaických panelů je napětí 12 V, 24 V a 48 V [19].



Obrázek 3.1: Průřez fotovoltaickým panelem. [20]

### 3.2 Získaný výkon

Nominální výkon fotovoltaických panelů je udáván v jednotkách Watt peak (Wp), jde o výkon vyrobený solárním panelem při standardizovaném výkonostním testu, tedy při energetické hustotě záření  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$  a světelném spektru odpovídajícím slunečnímu záření po průchodu bezoblačnou atmosférou Země. Watt peak je jednotkou špičkového výkonu dodávaného solárním zařízením za ideálních podmínek, jde tedy přibližně o výkon dodávaný panelem nebo systémem za běžného bezoblačného letního dne [21].

Pro lepší orientaci o průměrném výkonu fotovoltaických panelů, resp. o množství elektrické energie, kterou jsou fotovoltaické panely schopny denně poskytnout je vhodné použít veličinu elektrické energie ve Watthodinách (Wh), kterou jsou panely schopny poskytnout průměrně za jeden den.

Kromě získaného výkonu je důležitým parametrem při posuzování jednotlivých panelů jejich účinnost. Vyšší účinnost je také aktuálním trendem ve vývoji nových fotovoltaických panelů. V tabulce 3.1 jsou uvedeny běžně dostupné fotovoltaické panely, které měly na začátku roku 2017 největší výkon a účinnost.

Tabulka 3.1: Fotovoltaické panely s největším výkonem a účinností na trhu v lednu 2017. [18]

Typ	Výrobce	Plocha panelu [m <sup>2</sup> ]	Nominální výkon [W]	Hustota výkonu [W/m <sup>2</sup> ]	Účinnost [%]	Komentář
Monokrystal	SunPower X-Series	1,63	360	221	22,2	Bez olova
Monokrystal	SunPower X-Series	1,63	327	201	20,4	Bez olova
Monokrystal	Yingli Solar Panda Series 2	1,62	300	185	18,5	-
Polykrystal	Yingli Solar YGE Series	1,62	275	170	16,9	-
		1,94	325	168	16,7	
CdTe	First Solar Series 4	0,72	118	164	16,3	-
CIGS	Solar Frontier Avancis Power Max	1,05	140	133	13,3	RoHS vyhovující

### 3.3 Životnost fotovoltaických panelů

Životnost fotovoltaického panelu je definována poklesem výkonu o 20 %. Téměř všichni výrobci běžně dostupných krystalických a tenkovrstvých panelů garantují maximální pokles účinnosti o 10 % za 10 až 12 let a 20 % za 25 let. V praxi se však na nejstarších instalacích pokles účinnosti po 25 letech pohybuje kolem 6 až 8 %. Skutečná životnost proto bude výrazně delší.

V současnosti se předpokládá, že životnost definovaná poklesem účinnosti o 20 % bude u kvalitních panelů minimálně 30 až 40 let od jejich instalace. Panely však mohou být funkční i po této době, pouze jejich účinnost bude postupně dále klesat. Investor může zvážit, zda je pro něj výhodnější vyrábět elektřinu s nižší účinností, nebo investovat do nových panelů. Jak vyplývá z dotazníku, který si nechalo zpracovat profesní sdružení podnikatelů s názvem Solární asociace v roce 2016, rekonstrukci solárního zařízení po ukončení státní podpory zvažuje jen necelá polovina majitelů. Přesný výsledek na tuto otázku včetně rozdělení podle výkonu elektrárny je v tabulce 3.2. Jednou ze zajímavých otázek v tomto dotazníku bylo, zdali dotázaný provozovatel předpokládá pokračování provozu své fotovoltaické elektrárny po skončení státně garantované finanční podpory. Výsledky této otázky jsou v tabulce 3.3. Staré panely ani v tom případě nemusí být zlikvidovány, ale mohou být nabídnuty zájemcům, pro něž je nízká cena panelů důležitější než jejich účinnost. Životnost panelů se tím může významně prodloužit, podle současných odhadů pravděpodobně až k horizontu 50 i více let. [22]

Tabulka 3.2: Dotazník Solární asociace: Rekonstrukce zařízení.

Budete provádět rekonstrukci stávajícího zařízení po ukončení státní podpory?	Celkem	do 30 kW	nad 30 kW do 100 kW	nad 100 kW do 1 MW	nad 1 MW
Ano	50	43	5	2	0
Ne	69	57	4	5	3

Tabulka 3.3: Dotazník Solární asociace: Pokračování v provozu.

Předpokládáte pokračování provozu Vaší FVE po ukončení státně garantované finanční podpory?	Celkem	do 30 kW	nad 30 kW do 100 kW	nad 100 kW do 1 MW	nad 1 MW
Ano	114	94	9	8	3
Ano, ale nejsem v režimu provozní podpory výroby (instalace zdroje po r. 2013) případně provozuji FVE bez licence	6	6	0	0	0
Ne (likvidace elektrárny)	4	3	0	0	1

### 3.4 Materiálové složení panelů

V současné době jsou tedy fotovoltaické moduly na konci své životnosti považovány za průmyslový odpad. Většina článků určených k likvidaci je neporušených a jsou vyvinuty metody recyklace pro obnovu starých fotovoltaických článků do nových. Největší podíl na hmotnosti krystalických panelů připadá na sklo a to mezi 60 a 70 %. Následován je hliníkovým rámem, jehož podíl je až 20 %. U tenkovrstvých panelů je podíl skla a hliníku přes 95 %. Oba tyto materiály jsou běžně recyklovány z téměř 100 %. Kompletní materiálové složení krystalických a tenkovrstvých panelů je v tabulce 3.4 a tabulce 3.5.

Tabulka 3.4: Materiálové složení krystalických panelů.

Materiál	Materiálová náročnost [kg/kWp]	Hmotnostní podíl [%]	Výtěžnost recyklace [%]
Sklo	60	67	>95
Hliník	16	18	100
Plasty	10	11	-
Křemík	3	3	85
Junction box	2	2	-
Měď	1	1	80

Tabulka 3.5: Materiálové složení tenkovrstvých panelů.

Materiál	Materiálová náročnost [kg/kWp]	Hmotnostní podíl [%]	Výtěžnost recyklace [%]
Sklo	150	84	>95
Hliník	20	12	100
Plasty	5	3	-
Ostatní	2	1	≈90

### 3.4.1 Hliník

Primární produkce je energeticky náročná – 200 MJ/kg elektřiny a představuje asi 8 % spotřeby energie na výrobu celého panelu. V současnosti jsou proto vyráběny i panely bez rámu. Tato praxe však není nutná, hliník lze snadno recyklovat s velmi nízkou spotřebou – 8 MJ/kg převážně tepelné energie, výtěžnost se u kusového hliníku, kam spadají i rámy fotovoltaických panelů blíží 100 %.

### 3.4.2 Sklo

Základní konstrukční díl všech typů fotovoltaických panelů, pouze v některých případech jsou používány plastové materiály. Recyklace skla může snížit spotřebu energie na jeho výrobu asi o 40 %. Recyklace však významně snižuje nároky na těžbu surovin a kapacitu skládek odpadů. Výhodou skla je, že většinu případů lze materiál recyklovat na původní výrobek.

### 3.4.3 Plastové komponenty

Vlivem klimatických podmínek obvykle degradují, jen vzácně je lze jednoduchými metodami recyklovat na původní výrobek. V praxi se spíše využívá energie, kterou je možno uvolnit jejich spálením.

### 3.4.4 Fotovoltaické články

U klasické krystalické technologie se podíl článků na hmotnosti panelů pohybuje v jednotkách procent, v průběhu času se přitom významně snižuje. Krystalické články se však podílejí až 80 % na spotřebě energie na výrobu panelu a zhruba 50 % na jeho ceně. Na konci životnosti jsou přitom články v podstatě nezměněny. S recyklací celých článků nebo desek jsou již první praktické zkušenosti. Podíl funkčních vrstev tenkovrstvých článků na hmotnosti panelů i na nákladech na jejich výrobu je ještě o jeden až dva řády nižší. I v tom případě se však jedná o cenné polovodičové materiály, jejichž zpětné získávání je obvykle výhodnější než ze surovin.

### 3.4.5 Těžké kovy

Představují z hlediska hmotnosti, ceny i spotřeby energie na výrobu panelů zanedbatelné položky. Podíl jednotlivých kovů na hmotnosti panelů se pohybuje v desetinách promile. Konkrétně se jedná o 0,12 % olova, 0,14 % stříbra, 0,12 % cínu a 0,37 % mědi. Energetická i

materiálová náročnost recyklace je srovnatelná s výrobou z primárních surovin. Recyklace je však nutná z jiných důvodů. Těžké kovy jsou toxické a je proto nutno je oddělit od životního prostředí. Mimoto zejména u stříbra je již v blízké budoucnosti očekáváno vyčerpání ekonomicky těžitelných zásob a v důsledku toho růst nákladů na těžbu, a tedy i ceny stříbra. Je pravděpodobné, že problém bude vyřešen použitím jiných materiálů. [23]

### **3.5 Recyklace vysloužilých fotovoltaických elektráren**

K recyklaci fotovoltaických panelů byl vytvořen systém PV Cycle. Jedná se o celoevropskou aktivitu výrobců a dodavatelů fotovoltaických panelů založenou na dobrovolné zodpovědnosti za výrobek v průběhu celého životního cyklu.

#### **3.5.1 Ekonomické hledisko**

Ekonomickou otázku likvidace upravuje novela zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech z roku 2012. Tato novela přenáší povinnosti spojené s recyklací solárních panelů uvedených na trh před 1. 1. 2013 na všechny provozovatele fotovoltaických elektráren. Tito provozovatelé byli povinni do 30. 6. 2013 uzavřít smlouvu s některým z kolektivních systémů, kde současně největší je společnost REsolar s.r.o. Následně jsou provozovatelé povinni v období od 1. 1. 2014 do 31. 12. 2018 uhradit v pravidelných splátkách do zvoleného kolektivního systému příspěvek, který je vyhláškou stanovený na 8,50 Kč na kg panelu. Váha panelu však v tomto případě není stanovena jeho skutečnou váhou, nýbrž hodnotou stanovenou vyhláškou. Ta činí 0,11 kg/Wp a podle mnoha provozovatelů zvyšuje skutečnou váhu panelů. [24]

Vyhláška č. 178/2013 Sb. také upravuje způsob nakládání s finančními prostředky vybranými na recyklaci fotovoltaických panelů dodaných na trh do 1. 1. 2013, který nebyl podchycen v zákoně. Zakazuje křížové financování s jinými činnostmi provozovatele recyklačního systému, včetně recyklace panelů dodaných po 1. 1. 2013. Dále nařizuje uložení finančních prostředků na zvláštní účet u banky v České republice a omezuje možnosti investování na vybrané druhy dluhopisů. Veškeré nakládání s finančními prostředky má provozovatel recyklačního systému povinnost uvádět v roční zprávě. Tato omezení mají za cíl minimalizovat riziko vytunelování těchto prostředků. [25]

Provozovatelé fotovoltaických elektráren, kteří na elektrárnách využívají fotovoltaických panelů uvedených na trh po 1. 1. 2013 se tohoto systému neúčastní. Mají likvidaci zajištěnou výrobcem, popř. dodavatelem panelů v rámci programu PVcycle.

Zde je však důležité vysvětlit, že zákon neukládá provozovatelům FVE povinnost nyní uzavírat jakoukoliv smlouvu o likvidaci nebo recyklaci panelů, nebo se zavazovat k jakékoliv budoucí likvidaci panelů apod. Ukládá pouze povinnost zajistit financování budoucí recyklace. Zjednodušeně řečeno, prostřednictvím konkrétní právnické osoby naspořit určitý finanční obnos, který lze v budoucnu využít na ekologickou likvidaci FV panelů se souhlasem Ministerstva životního prostředí.

V nejbližších 10 až 20 letech lze očekávat, že množství panelů vyřazených z provozu bude velmi nízké. Bude se většinou jednat o panely poškozené při nehodách a živelních pohromách. Odhady se pohybují od několika set do 1000 tun ročně. Ve srovnání s celkovou produkcí odpadů v České republice (přes 20 mil. tun) se jedná o zlomky promile. Kvalitní panely

instalované v letech 2009 až 2011 budou vyřazovány z provozu ve větších objemech pravděpodobně až po roce 2040.

Panely nižší kvality zřejmě budou vyřazovány dříve, jejich množství je však obtížné odhadnout. Na konci roku 2010 v horečné snaze dokončit projekty velkých fotovoltaických elektráren za každou cenu byli investoři ochotni koupit v podstatě cokoli. Importu výrobků nízké kvality se snažily zabránit banky tím, že si vytvářely seznamy doporučených typů panelů, respektive dodavatelů. Ani nekvalitní panely však nemusí být vyřazeny z provozu. Nejčastějším problémem je nižší výkon nebo rychlejší pokles účinnosti. Několik reklamací tohoto typu již proběhlo, ve všech případech však prozatím investor přistoupil na vrácení části kupní ceny.

Za ekonomicky rentabilní je považována kapacita recyklační linky kolem 20 000 tun panelů ročně. Taková množství panelů lze očekávat nejdříve v roce 2035, spíše však v roce 2040. Do té doby bude výstavba specializované recyklační linky nerentabilní. Využití univerzálních recyklačních metod, respektive zařízení na druhou stranu nezaručuje efektivní využití speciálních fotovoltaických materiálů. Z uvedených důvodů by vhodným řešením minimálně do roku 2030 bylo přistoupení České republiky k systému PV Cycle a recyklace panelů na stávajících linkách v Německu. [22] Množství instalovaných fotovoltaických panelů je zobrazeno v tabulce 3.6

Tabulka 3.6: Množství instalovaných fotovoltaických panelů.

Rok	Instalovaný výkon [MWp]	Množství panelů [t]
2007	3,4	400
2008	60	7 000
2009	400	45 000
2010	1 450	160 000
2011	50	6 000

### 3.5.2 Termická recyklace

V současnosti zřejmě nejpokročilejší metodu recyklace panelů navrhla a odzkoušela firma Deutsche solar AG. Celé panely jsou zavezeny do speciální pece, kde jsou zahřívány na teplotu nad 500 °C. Při této teplotě se plastové materiály odpaří, následně jsou v další komoře řízeně spalovány. Ostatní materiály jsou separovány ručně. Jsou-li panely nepoškozené, lze vytěžit až 85 % článků pro nové použití. Spotřebu energie na výrobu nových panelů je díky tomu možno snížit až o 70 %. Metoda je použitelná pro všechny stávající konstrukce panelů z krystalických článků.

### 3.5.3 Mechanicko-chemická metoda

Pro likvidaci panelů je navrhován podobný postup jako při recyklaci LCD televizorů. Na začátku se ručně demontuje hliníkový rám. Následuje drcení a třídění velikostních frakcí. K oddělení jednotlivých materiálů slouží separační metody – fluidní a mokré splavy a elektrodynamická separace. Stříbro a další zájmové kovy jsou získávány chemicky a pyrometalurgicky. Získané kovy mohou být použity jako surovina v metalurgickém průmyslu,

plasty budou pravděpodobně likvidovány spálením s možností využít teplo. Ve srovnání s termickou recyklací je u této metody nižší podíl ruční práce. Výsledkem jsou však pouze drcené suroviny. Metoda je použitelná spíše pro tenkovrstvé panely, u nichž nelze polovodičové materiály získat jiným způsobem. [22]



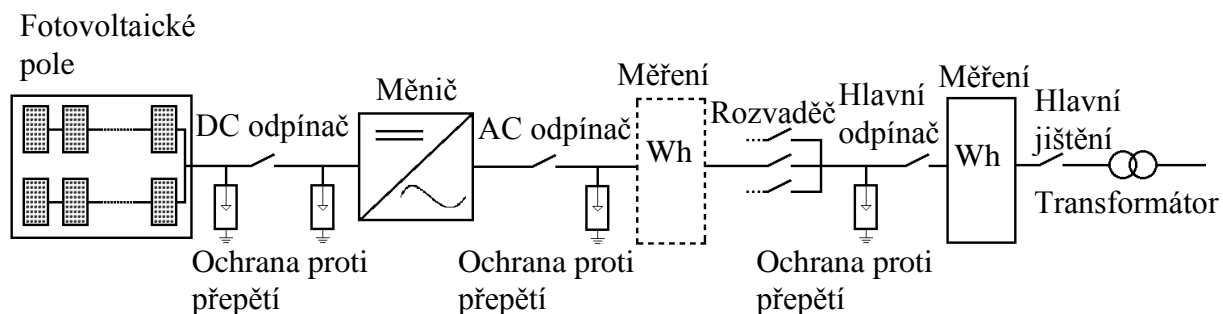
## 4 PRINCIP FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN

Samostatnou kapitolou je princip zapojení samotných fotovoltaických elektráren a popis jejich částí.

### 4.1 Obecné schéma zapojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě

Na obecném schématu, který je na obrázku 4.1 je příklad provedení fotovoltaického zdroje, který pracuje paralelně s distribuční sítí. Zdrojem elektrické energie je fotovoltaické pole, které je pomocí kabelů spojeno s měničem. V případě většího počtu paralelně řazených řetězců (stringů) je třeba zajistit ochranu fotovoltaických panelů proti zpětným proudům a nadproudovou ochranu kabelů fotovoltaického pole při poruše. Současně je řešena i ochrana proti přepětí. Jedná-li se o delší vedení mezi fotovoltaickým polem a měničem, je vhodné použít svodiče přepětí jak u měniče, tak v blízkosti fotovoltaického pole. K zajištění údržby měniče je nutné splnit požadavek na jeho možné odpojení od AC i DC strany, proto jsou u měniče instalovány DC a AC odpínače. V případě, že je funkčně zajištěno, aby vypnutí, popř. zapnutí DC strany probíhalo vždy bez zátěže, tzn. že AC strana bude vypínána dříve, popř. zapínána následně, pak lze na místě DC strany použít i odpojovač.

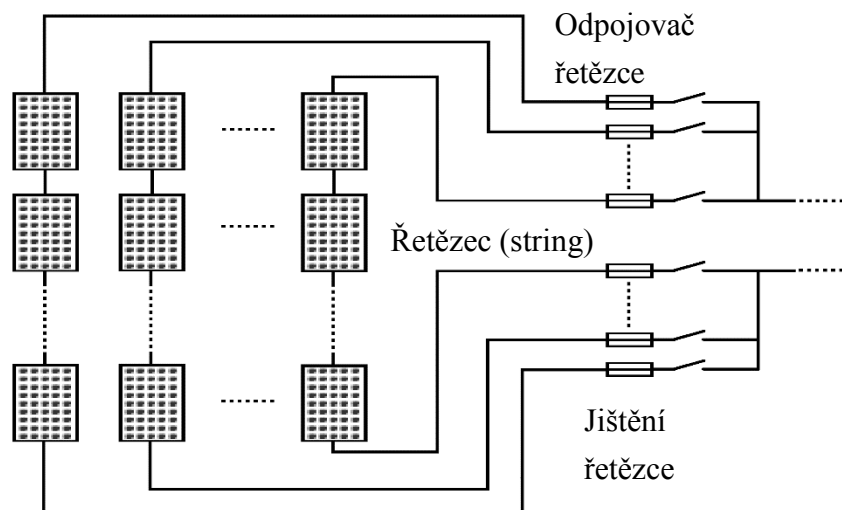
Za AC odpínačem je opět instalován svodič napětí, který je doporučen především následuje-li dlouhé vedení. Dále může být zapojeno místní měření elektrické energie vyrobené fotovoltaickým zdrojem, které je následně připojeno přes jistící prvek k rozvaděči. V případě fotovoltaického zdroje velkého výkonu jsou do rozvaděče připojeny přes jistící přístroje jednotlivé paralelní větve fotovoltaického zdroje. Rozvaděč a následný elektrický rozvod je chráněn ze strany připojení k distribuční síti dalším svodičem přepětí. Měření dodané a spotřebované energie nebo, pokud jde o výrobu bez vlastní spotřeby, pouze dodané energie předchází hlavní odpínač energie. Rozvaděč, odpínač a vedení směrem k distribučnímu rozvodu je chráněno proti přetížení a zkratu hlavním jisticím přístrojem.



Obrázek 4.1: Obecné schéma fotovoltaického zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí.

V případě většího počtu paralelně řazených řetězců ve fotovoltaickém poli, viz obrázek 4.2, je nutné zajistit ochranu fotovoltaických panelů proti zpětným proudům a

nadproudovou ochranu kabelů. Jištění řetězců bývá opomíjeno, a to v souvislosti s tím, že zkratový proud fotovoltaického panelu je o 10-20 % větší než jeho jmenovitý provozní proud. V případě zapojení elektrárny s počtem maximálně tří řetězců nehrozí poškození panelu poruchovým zpětným proudem vyvolaným zkratem. Riziko tepelného přetížení kabelů vlivem zkratu lze v tomto případě řešit jejich vhodným naddimenzováním. Při větším počtu paralelních řetězců je nutno vzít v potaz hodnotu možného zpětného proudu s ohledem na maximální dovolený zpětný proud fotovoltaického panelu [26].



Obrázek 4.2: Detail fotovoltaického pole.

#### 4.1.1 Střídač pro fotovoltaickou elektrárnu

Důležitou částí, samozřejmě po samotných fotovoltaických panelech, jsou střídače. Střídač, někdy nazývaný měnič nebo invertor, slouží k přeměně stejnosměrného napětí vyráběného fotovoltaickými panely na střídavé napětí elektrorozvodné sítě. Střídač však může mít i celou řadu dalších doplňkových funkcí jako např. monitoring sítě a provozních údajů, ochranné funkce atd. Příklad střídače je na obrázku 4.3

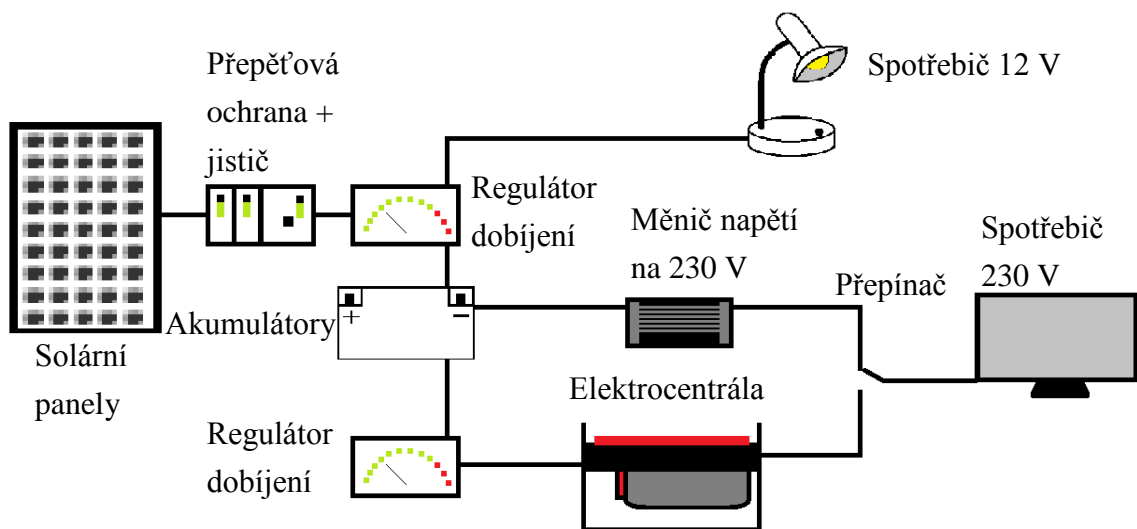


Obrázek 4.3: Střídač společnosti ABB s maximálním výkonem 1 MW a účinností 98,8 %. [27]

## 4.2 Ostrovní systém

Ačkoliv je tato práce zaměřena především na velké fotovoltaické elektrárny připojené k distribuční síti, je vhodné zmínit i její alternativu. Ostrovní systém je zapojení, kdy fotovoltaická elektrárna nedodává do distribuční sítě přebytečnou elektřinu, popřípadě k ní není vůbec připojena. Nejlépe se tedy hodí do míst bez přívodu elektrické energie distribuční sítě. Vhodné je tedy použití na chatách, zahradních domcích, karavanech či vodních plavidlech, kde se jedná o instalované výkony od několika stovek wattů až po rozsáhlé třífázové ostrovní systémy s výkonem několik kilowatt.

Složení ostrovního fotovoltaického systému je podstatně jednodušší než u předchozích typů připojení. Základem je fotovoltaický panel, akumulátor, regulátor napájení baterií a střídač. Celé zapojení je na obrázku 4.4



Obrázek 4.4: Schéma zapojení ostrovního systému s elektrocentrálou.

#### 4.2.1 Akumulátor

Hlavním rozdílem mezi ostrovním systémem a systémem určeným pro dodávání přebytečné energie do distribuční sítě je přítomnost akumulátoru. Na první pohled jsou velmi podobné klasickým autobateriím, ale liší se svojí konstrukcí, cenou a především životností. Životnost klasické autobaterie při připojení do solárního systému je cca 2 roky (80–100 cyklů při vybíjení na 80 %).

Z konstrukčního hlediska se oproti klasickým bateriím liší především zesílenou mřížkou elektrod, díky čemuž je dosaženo vyšší odolnosti při tzv. cyklickém vybíjení. Jednotlivé akumulátory pro ostrovní solární systém se poté mezi sebou liší především formou elektrolytu.

První a levnější variantou je klasické zaplavení elektrod kapalinou. Tyto akumulátory kromě počtu cyklů přebírají veškeré vlastnosti klasické autobaterie. Životnost je zhruba 300 cyklů při vybíjení na 50 %. Druhou možností je vazba elektrolytu na křemičitý gel. Tato technologie přináší mnoho výhod jako například absolutní bezúdržbovost, nízkou míru samovybíjení, teplotní stabilitu, vysokou odolnost vůči hlubokému vybíjení, snížení rizika poškození vlivem vibrací, polohování akumulátoru nebo nízká koroze elektrod. K nevýhodám této technologie však patří téměř dvojnásobná cena a přibližně o polovinu vyšší váha. Cyklická životnost je u tohoto typu baterií přibližně 750 cyklů při vybití na 50 %. Příklad typického gelového akumulátoru firmy Victron Energy je na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: Gelový akumulátor Victron Energy pro ostrovní systém. [28]

#### 4.2.2 Regulátor dobíjení

Regulátor je zapojen mezi solárním panelem a akumulátorem. Jeho hlavní funkcí je správné nabíjení podle jeho stavu nabití. Regulátory se dělí podle napětí akumulátor (12 V, 24 V nebo 48 V), podle maximálního vstupního napětí ze solárního panelu a podle maximálního vstupního proudu ze solárního panelu. Mimo tyto existují ještě regulátory s funkcí MPPT (Maximum Power Point Tracking). Tyto regulátory jsou výrazně dražší, ovšem dokážou zvýšit energetický výnos z panelu až o 30 % [29]. Této funkce se využívá především tam, kde nejsou solární systémy předimenzovány. Doplnkovými funkcemi většiny regulátorů je komunikační rozhraní přes Ethernet, displej s aktuálními informacemi atd. Příkladem může být regulátor od firmy TriStar na obrázku 4.6



Obrázek 4.6: Regulátor Morningstar - Tristar MPPT 60A. [30]

### 4.2.3 Střídač pro ostrovní systém

Jak je vidět na obrázku 4.4, při výstavbě ostrovního fotovoltaického systému je potřeba vždy přizpůsobit i spotřebiče, které na následné síti budeme provozovat. Ostrovní systémy pracují pouze se stejnosměrným proudem a napětí 12 V, 24 V nebo 48 V. Na tato napětí existuje poměrně široký sortiment základních spotřebičů. Někdy je však potřeba připojit i jiné zařízení, např.: stolní počítač. K tomuto slouží střídač, který z připojeného stejnosměrného napětí tvoří napětí střídavé o velikosti 230 V. Střídače jsou běžně schopné volit zdroj pro síť. Například při vybitých bateriích nebo přetížení jsou schopny přepnout na rozvodnou síť, popř. elektrocentrálu. Střídače se liší pouze podle maximálního příkonu spotřebičů, které lze na střídač připojit. Střídače se vždy dimenzují s rezervou v řádu desítek procent. Příkladem může být střídač MPPT 100/50 od firmy Victron Energy, který je na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Střídač napětí EasySolar s funkcí regulátoru. [31]



## 5 TYPY ZÁVAD

Závady na fotovoltaických elektrárnách jsou velice závažným problémem, kterým se snaží většina provozovatelů fotovoltaických elektráren zabránit.

### 5.1 Závady způsobené hlodavci

První, na pohled úsměvnou, závadou, která se vyskytuje na solárních elektrárnách je nedostatečná ochrana před hlodavci a kunami. Ty většinou působí škody na nedostatečně ochráněné kabeláži, která zpoza fotovoltaických panelů volně visí. Příklad nesprávně vedené kabeláže je na obrázku 5.1. Další škoda může být způsobena v přidružených trafostanicích a prostorách určených k uložení měničů. Kromě již zmíněné nedostatečné ochrany kabeláže bývá příčinou snaha ušetřit na jedu, popřípadě na odpuzovači zvěře. Tyto odpuzovače vysílají ultrazvukový signál, který je nastaven nad hranici slyšitelnosti pro člověka, ale je velmi nepříjemný právě pro hlodavce a kuny.

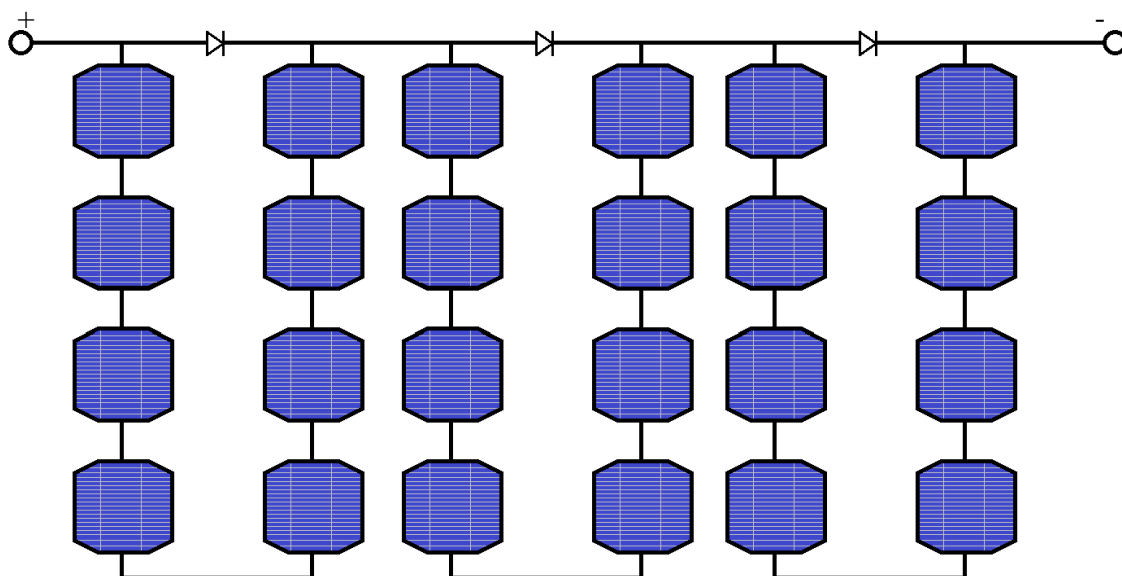


Obrázek 5.1: Nesprávně vedená kabeláž.

Následná oprava nebývá levnou záležitostí, pokud k ceně opravy přičteme i nulovou výrobu energie. Příkladem může být škodná událost na jedné z fotovoltaických elektráren v ČR v roce 2010, kdy hlodavci bylo překousáno 100 m kabeláže. Celková škoda pak dosáhla 1,5 milionu korun.

## 5.2 Závady překlenovacích (Bypass) diod

Z důvodu ochrany článků před tepelným zničením a následnému poklesu výkonu jsou k solárním článkům připojeny překlenovací neboli bypass diody. Tyto diody mají za úkol odpojit článek v době jejich zastínění, a tedy eliminaci poklesu výkonu solárního panelu a proudu, který by jinak procházel zastíněnými články. V současné době se překlenovací diody zapojují tak, aby překlenovaly 18–24 článků. Pro dokonalou ochranu by však bylo nejlepší použít překlenovací diodu pro každý článek zvlášť. To však není možné jednak z ekonomických důvodů, ale především, že překlenovací diody způsobují určitý ztrátový proud, který by se projevil snížením výsledného proudu dodávaného solárními články. Pro běžné krystalické panely, které obsahují 60–72 fotovoltaických článků, se používají 3–4 překlenovací diody. Tyto diody jsou většinou součástí spojovací krabičky, která je ze spodní strany panelu. V poslední době se na trhu objevují fotovoltaické panely, které mají tyto překlenovací diody integrovány přímo v samotných solárních článcích. Tyto panely poté vykazují menší ztráty vlivem nesouměrného ozáření. Jejich nevýhodou je však vysoká cena. Propojení fotovoltaického panelu včetně zapojení překlenovacích diod je na obrázku 5.2. [32]



Obrázek 5.2: Propojení fotovoltaického panelu a překlenovací diody.

K poruše překlenovací diody nejčastěji dochází při zásahu elektrárny, resp. její ocelové konstrukce, bleskem, poddimenzováním nebo špatným uchycením překlenovací diody. Následkem nefunkční překlenovací diody dochází k přehřívání části fotovoltaického panelu a následnému vzniku horkých míst a trvalému poškození jednotlivých fotovoltaických článků.

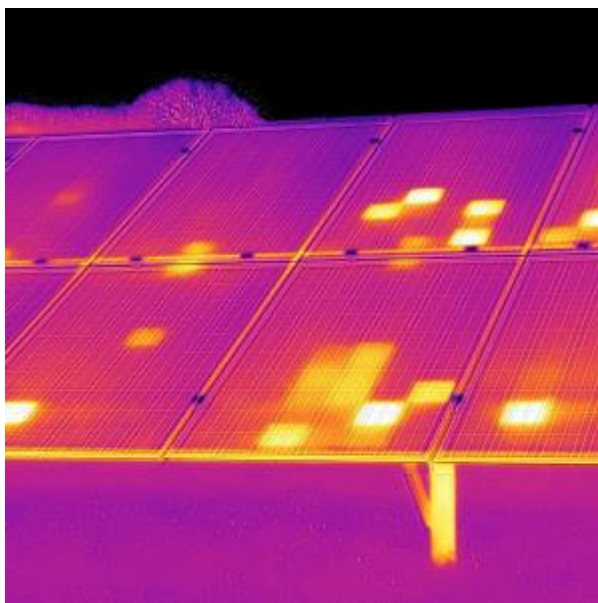
## 5.3 Horká místa (Hot Spots)

Jde o další častý defekt vyskytující se na fotovoltaických panelech, kdy na panelu vznikají horká místa neboli hot spots. Tyto defekty vznikají v místech defektů krystalické mříže fotovoltaických článků. Následkem jsou pak tzv. mikro-mini trhliny spojené s lokální



nadměrnou produkcí tepla. Dle několikaletých zkušeností Ing. Milana Tomeše CSc. – soudního znalce v oboru fotovoltaiky dochází při zdvihu horkých míst oproti okolním článkům o více než 50 °C k destrukci fotovoltaického článku a tím i celého fotovoltaického panelu. Tato horká místa je možné pozorovat zhnědnutím zadní strany panelu, pohmatem rukou, termovizí či elektroluminiscencí. [33] Příklad diagnostikovaných horkých míst pomocí termovize je na obrázku 5.3.

Příčinou vzniku horkých míst bývá zastínění části panelu, kdy část sériově spojených článků je plně osvětlena a část je zastíněna. V případě, že se pracovní proud tohoto řetězce přiblíží zkratovému proudu zastíněného článku, stane se zastíněný článek spotřebičem v obvodu. Výsledkem je obrovský ztrátový výkon na malé ploše, což vede k lokálnímu přehřátí neboli horkému místu, které vedou k zničení článku, prasknutí krycího skla a degradaci okolních fotovoltaických článků. [34]



Obrázek 5.3: Výsledek diagnostiky horkých míst s pomocí termovize. [35]

## 5.4 Závady na střídačích

Závady na střídačích patří v provozu elektrárny k těm vůbec nejzávažnějším. Při jejich poruše totiž nedojde k výpadku několika panelů, ale klidně celé elektrárny. Při uvedení na příkladu se střídačem z kapitoly 4.1.1. Pokud dojde k výpadku plně zatíženého střídače v období jara a léta a elektrárna využívá nejvyšší možné státní podpory, tedy 12 903 Kč/MWh, dojde denně ke ztrátě přibližně 58 000 Kč.

Mezi nejčastější závady patří špatné chlazení střídače, často vlivem vysoké hustoty střídačů, kdy velkou většinou provozovatelů je monitorována pouze funkčnost střídače a výroba. Nikoliv její provozní parametry. Další častou závadou je nesprávné dimenzování kabeláže, kdy zřejmě ve snaze ušetřit byl snižován průřez vodičů, popř. jejich neodborné připojení ke svorkám střídače. Ve snaze ušetřit také velké části střídačů chybí přepětová ochrana, a to jak na straně stejnosměrné, tak střídavé. Další závadou střídačů, která se v prvotních letech projevovala bylo připojení střídačů, které nebyly určeny pro český trh. Většinou se jednalo o střídače, které byly určeny pro jižní Evropu a Ameriku a měly nastaveny

body zápalu vztažené ke klimatickým podmínkám daného státu. Jinými slovy se střídač s prvními ranními paprsky několikrát zapnul a vypnul na místo pouze jednoho sepnutí. To vedlo k opotřebenosti relé a častým odstávkám elektráren. Další závady bývají způsobeny nesprávným umístěním střídače, kdy dochází k vniknutí vody do střídače, popř. vniknutí hlodavců, kteří při procházce po vnitřních komponentech většinou svou smrtí způsobují zkrat a výpadek střídače.

Naprostá většina těchto závad je přisuzována spěchu při stavbě a často neodbornosti montáže. Tento spěch je přisuzován solárnímu boomu, který je popsán v kapitole 1.2, kdy šlo o spuštění elektrárny před koncem roku 2010. Velká část odstávek elektráren je také přisuzována zanedbanému monitoringu. [36]

## 5.5 Ztráty z deklarovaného nominálního výkonu

Dalším důvodem ztrát z deklarovaného nominálního výkonu jsou mimo poškozené panely chyby v zapojení, špatné dimenzování kabelů, poruchy střídačů, odrazy povrchů a znečištění panelů. Problémem je, že na výkonu celé elektrárny a ani na jednotlivých větvích není možné poznat, že některá jeho část je vadná a nepracuje na 100 %, a to většinou až do té doby, než úplně vypadne z provozu a výrazněji začne ovlivňovat výkon některého segmentu. Ztráty z deklarovaného nominálního výkonu jsou zobrazeny v tabulce 5.1

Tabulka 5.1: Nejčastější ztráty z deklarovaného nominálního výkonu.

Důvod ztráty výkonu	Výkonová ztráta na elektrárně [%]
Ztráty vlivem teploty podle typu použité technologie	6–10
Úhlová odrazivost	3–3,5
Nevhodně dimenzovaná kabeláž	4–6,5
Poruchy střídačů	5–6,5
Skryté vady fotovoltaických panelů	1–3,5

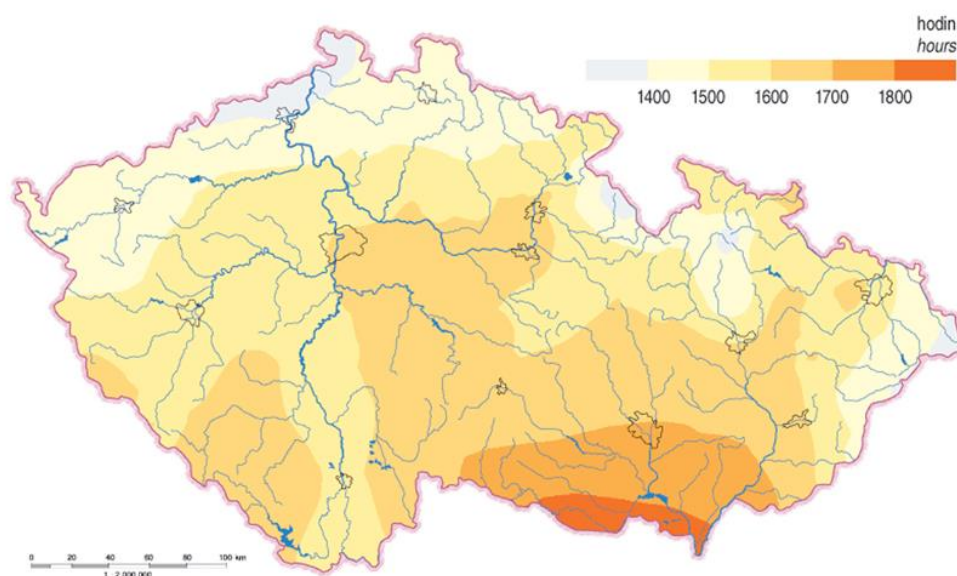
Některé z výše uvedených typů ztrát jako např. ztráty vlivem teploty a úhlová odrazivost nelze v zásadě nijak ovlivnit a jsou součástí běžného projevu technologie. Ostatní lze většinou identifikovat a následně provedenou optimalizací pak zvýšit celkový výkon. [37]

## 5.6 Výměna poškozených fotovoltaických panelů

V případě poškození panelu je jedinou možností jeho oprava. Ačkoliv to z výsledků otázky 5 v kapitole 7.2.2 nevypadá. Výměna poškozeného fotovoltaického panelu za nový není na základě §9 energetického zákona 458/2000 Sb. možná, aniž by nedošlo k vystavení nové licence. Změna licence by pak zahrnovala změnu výkupní ceny na cenu aktuální, která je od 1. 1. 2014 0 Kč. Je však důležité podotknout, že tento zákon nemá zcela jasný výklad, a tak k výměnám panelů běžně dochází a není zaznamenán případ, kdy by na základě výměny panelu došlo ke změně vydané licence.

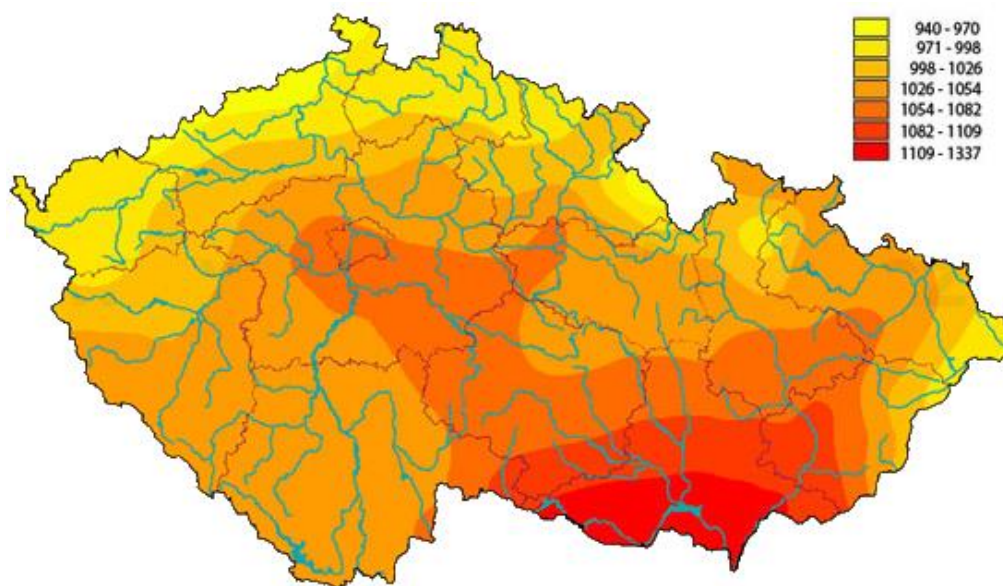
## 6 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ NAD ČESKOU REPUBLIKOU

Celkový roční úhrn dopadající sluneční energie ovlivňuje zejména zeměpisná poloha, orientace fotovoltaického systému vzhledem ke slunci, celková doba slunečního svitu, nadmořská výška a v neposlední řadě i čistota ovzduší.



Obrázek 6.1: Mapa trvání slunečního svitu na území České republiky. [38]

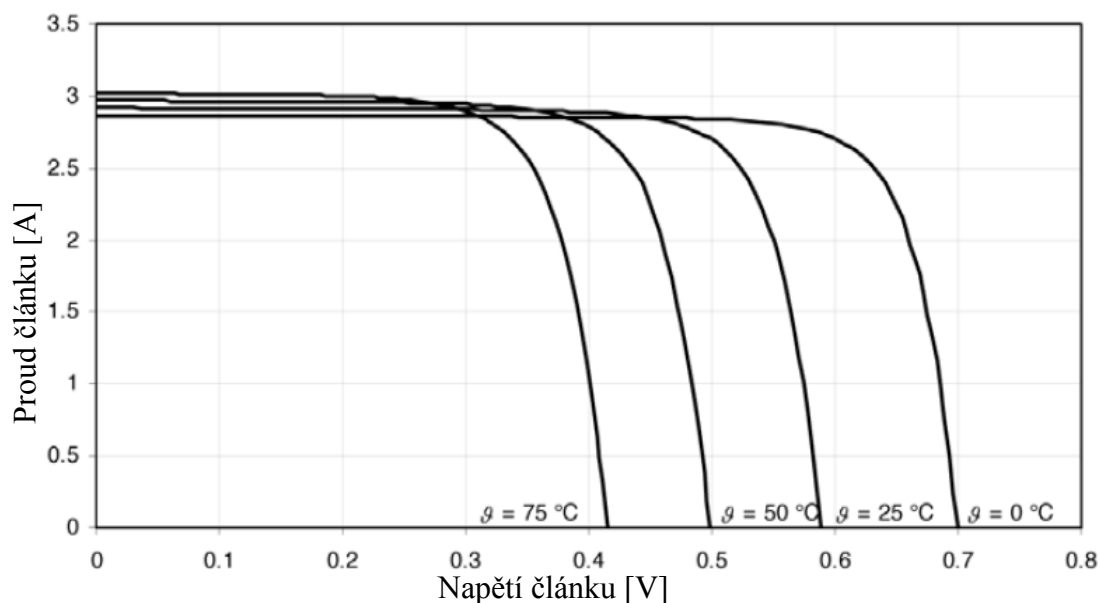
Podmínky pro využití sluneční energie jsou na území České republiky poměrně dobré. Celková doba slunečního svitu (bez oblačnosti) je od 1 400 do 1 700 hodin za rok viz obrázku 6.1. Vhodnost lokality pro využití sluneční energie však nejlépe vystihuje mapa globálního slunečního záření, která vychází z dlouhodobých meteorologických měření na obrázku 6.2. V podmínkách České republiky dopadne na jeden m<sup>2</sup> zhruba 950-1340 kWh sluneční energie z čehož největší část (asi 75 %) v letním období. Tento údaj je zajímavý v kontextu s kapitolou 6.2. Údaj o ročním úhrnu globálního slunečního záření je velmi důležitý pro výpočty budoucí energetické bilance fotovoltaického systému, a tedy i návratnosti investice. Známe-li, kolik slunečního záření ročně dopadne na 1 m<sup>2</sup> fotovoltaického systému a konverzní účinnost fotovoltaického panelu, která je přibližně 14 %, dostaneme z této plochy asi 133–188 kWh elektrické energie za rok. [38]



Obrázek 6.2: Roční úhrn globálního slunečního záření na území České republiky ve  $\text{W/m}^2$ . [38]

## 6.1 Teplotní koeficient výkonu

Teplotní koeficient výkonu fotovoltaického panelu (přesněji teplotní koeficient solárních článků v panelu): Teplotní koeficient výkonu udává pokles výkonu fotovoltaického panelu v závislosti na rostoucí teplotě fotočlánků, ze kterých jsou složeny fotovoltaické panely. Maximální výkon panelů, totiž klesá s jejich rostoucí teplotou. Běžná hodnota teplotního koeficientu je okolo  $0,47 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Při změně teploty o  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  dojde ke změně výkonu až o  $10 \text{ \%}$ . Nižší výkon panelů, je možné zaznamenat při vysokých letních teplotách, kdy se panely ohřívají na vysoké teploty. [32] Z napěťové charakteristiky s parametrem teploty na obrázku 6.3 je teplotní závislost zřejmá. Klesá napětí naprázdno a roste proud nakrátko. Současně se snižuje hodnota maximálního výkonu. Při instalaci FV modulů je tedy nutné zajistit přirozené proudění vzduchu pod modulem.



Obrázek 6.3: Teplotní závislost fotovoltaického článku. [32]

## 6.2 Orientace fotovoltaických panelů

Fotovoltaické panely je samozřejmě nutné vhodným způsobem nasměrovat tak, aby mohly pojmout co největší množství slunečního svitu. Ideální je směřovat panely přímo na jih. Ne vždy je však z pozičních důvodů možné směřovat panely přímo na jih a je potřeba je umístit s mírnou orientací na východ, popř. západ. Tato orientace sníží výkon fotovoltaických panelů v průměru o 10 % v zimě a asi o 3 % v létě.

Optimální sklon panelů se pohybuje mezi 35° až 49°. V letním období se slunce pohybuje výše nad úrovní horizontu než v zimě. Takže jsou-li fotovoltaické panely používány v období od cca března do cca října bude vhodné zvolit sklon od vodorovné osy kolem 35°. Pokud však budou panely používány celoročně, nebo pouze v zimě, pak je vhodné panely na vyšší úhel, tedy třeba až 49° a bylo možné ve špatných zimních podmínkách získat ze systému o trochu více el. energie. Naklopení panelů na vyšší úhel než 49°, nebo naopak nižší, než 35° je již kontraproduktivní nejen pro léto, ale i pro zimní období [32].

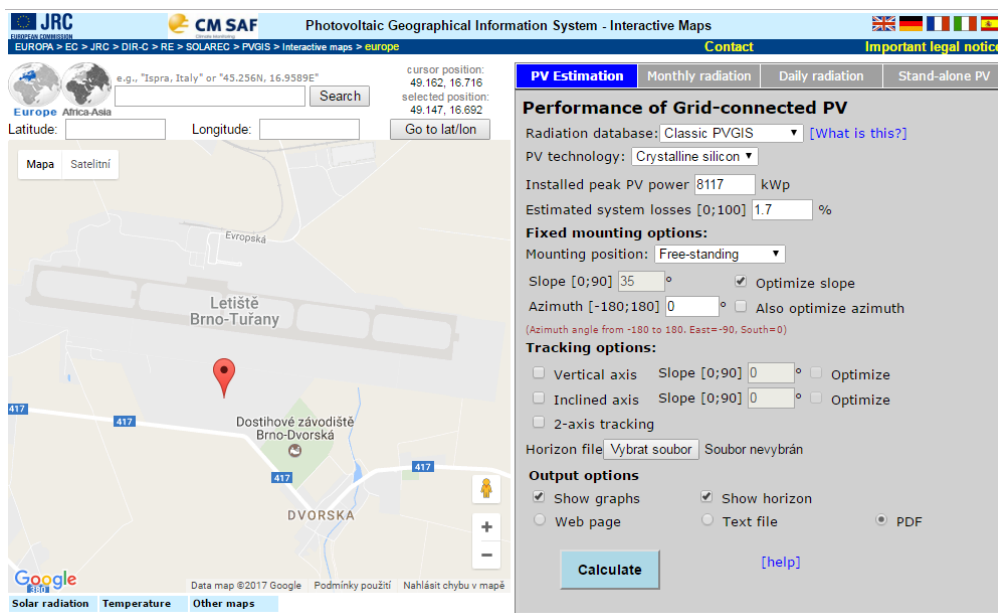
## 6.3 Simulace elektrárny s programem PVGIS

Výpočty získaných výkonů, teoretického natočení a dalších hodnot, které hrají svou roli při návrhu solární elektrárny již dávno neprobíhají na papíře. Za návrhem stojí ve většině případů výpočetní program, který počítá s hodnotami zadanými projektantem elektrárny. Jeden z nejrozšířenějších, volně šiřitelných webových nástrojů používaných pro simulaci umístění elektrárny je Photovoltaic Geographical Information System [38]. Tento nástroj pracuje s podporou geografického informačního systému neboli GIS.

Pro příklad použití tohoto programu bude simulována elektrárna FVE Brno – Letiště Tuřany, která se nachází vedle přístavací plochy letiště Brno – Tuřany a je největší fotovoltaickou elektrárnou v okrese Brno – Město. Ze seznamu fotovoltaických elektráren [39],

který je podrobněji popsán v kapitole 7.1, bylo zjištěno umístění elektrárny, její instalovaný výkon, který činí 8,117 MWp, a orientace panelů. Další informací je, že záměrem byla elektrárna s instalovaným výkonem 21,2 MWp s počtem téměř 90 000 panelů značky Tianwei. Z této informace a z produktové nabídky firmy [40] je zřejmé, že elektrárna je osazena 90 000 polykrystalickými panely s maximálním výkonem 235 Wp nebo přibližně 88 350 panely o výkonu 240 Wp.

Na úvodní obrazovce, která je na obrázku 6.4 je nejprve potřeba zvolit umístění elektrárny. To se provede s pomocí map od společnosti Google. Následuje výběr databáze záření, ze které budou parametry elektrárny počítány. Zde je na výběr databáze PVGIS-3 a PVGIS-CMSAF. Pro námi vybrané místo jsme zvolili databázi PVGIS-CMSAF, jelikož je aktuálnější a přesnější. Pro některé země (především země severní Evropy) je však k dispozici pouze databáze PVGIS-3, které jsou získané měřením mezi lety 1981–1990. Další položkou je výběr fotovoltaické technologie. Zde je na výběr krystalický křemík, bez rozlišení na monokrystal a polykrystal, tenké vrstvy a články tvořené z kadmia telluru. Následující položkou je zadání celkového instalovaného výkonu. Následující položka je očekávaných systémových ztrát, tedy vytvořeného výkonu, který padne za obět' udržování střídačů v chodu, ztrátám na vedení atd. Podle čtvrtletních zpráv ERÚ vyplývá, že se toto číslo pohybuje přibližně okolo 1,7 %. Další položkou je výběr instalace, kde na výběr je pole s fotovoltaickými panely nebo střešní instalace. Další možností je nastavení sklonu panelů a jejich orientace. Podle měření pomocí satelitního snímku na mapy.cz je azimut fotovoltaických panelů 180°. Sклон panelů však není znám, a proto jej necháme nastavit na optimální úroveň. Další nastavení se týká instalace polohovacího systému, což není případ námi měřené elektrárny. Poslední možností je nastavení výstupů simulace, kde si necháme zobrazit vše s exportem do PDF.



Obrázek 6.4: Úvodní obrazovka programu PVGIS.

Výstupní PDF soubor následně obsahuje zadané hodnoty. Následují ztráty způsobené vysokou teplotou a nízkým zářením. Tyto ztráty byly nasimulovány na 8,2 %. Dalším údajem jsou ztráty způsobené úhlovou odrazivostí. Ty jsou v tomto případě 3 %. Posledním údajem jsou ztráty způsobené ztrátami na invertorech, vedení atd. Tyto ztráty podle simulace činí

1,7 %. Následuje tabulka 6.1 s doporučeným optimálním sklonem, průměrnou denní a měsíční produkcí výkonu, průměrné denní a měsíční dopadající záření a celkovou roční produkcí.

Tabulka 6.1: Očekávané hodnoty produkce a záření pro elektrárnu FVE Brno – Letiště Tuřany.

	Solární pole: náklon panelů = 34° Orientace = 0° (jižní)			
Měsíc	$E_d$ [kWh]	$E_m$ [kWh]	$H_d$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$H_m$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Leden	9510	295000	1,21	37,6
Únor	16000	447000	2,06	57,7
Březen	23400	725000	3,16	97,8
Duben	30800	924000	4,34	130
Květen	35400	1100000	5,09	158
Červen	34800	1040000	5,09	153
Červenec	36400	1130000	5,41	168
Srpen	33100	1030000	4,87	151
Září	26100	784000	3,71	111
Říjen	20900	647000	2,84	88,1
Listopad	9760	293000	1,29	38,7
Prosinec	6620	205000	0,85	26,3
Roční průměr	23600	718000	3,33	101
Celkem za rok		8620000		1220

Kde:

$E_d$  – Průměrná denní produkce z instalovaného systému

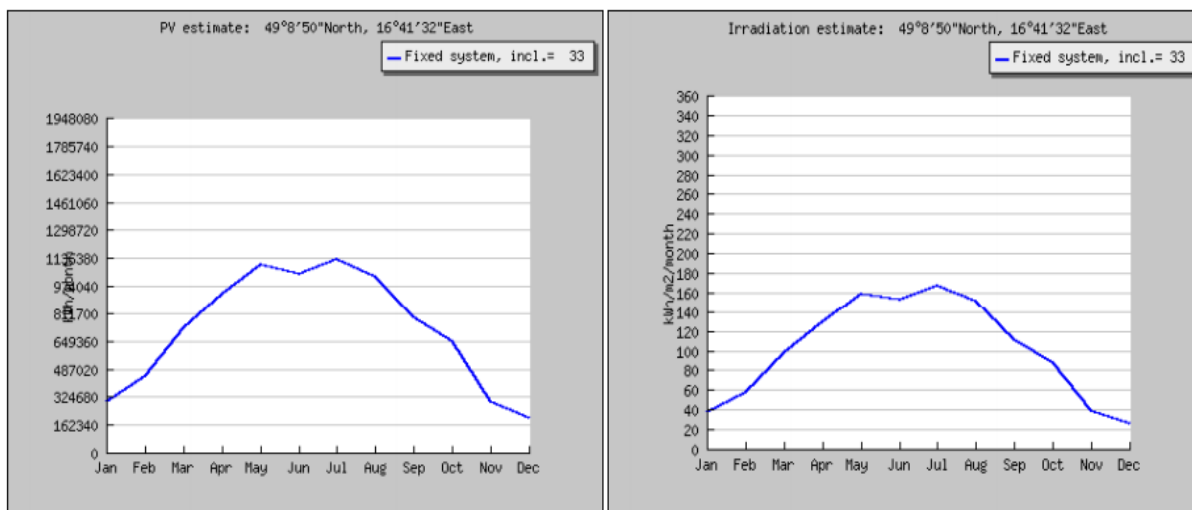
$E_m$  – Průměrná měsíční produkce z instalovaného systému

$H_d$  – Průměrné denní záření dopadající na moduly instalovaného systému

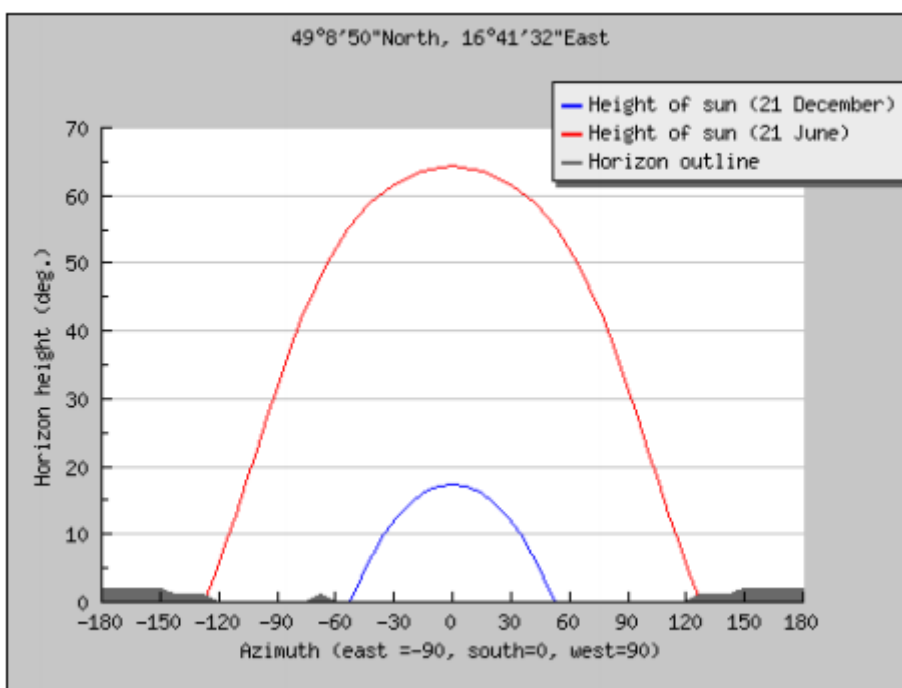
$H_m$  – Průměrné měsíční záření dopadající na moduly instalovaného systému

Dalším výstupem jsou grafy z těchto tabulkových hodnot. Jedná se o grafické vyjádření průměrné měsíční produkce. Tyto grafy jsou ve společném obrázku 6.5. Poslední výstupní graf z této simulace je znázorněn na obrázku 6.6. Tento graf znázorňuje siluetu horizontu se sluneční cestou při zimním a letním slunovratu.





Obrázek 6.5: Závislost průměrné měsíční produkce na měsíci [kWh/měsíc] (vlevo) a závislost průměrného měsíční záření dopadající na moduly instalovaného systému [kWh/m²/měsíc] (vpravo).



Obrázek 6.6: Silueta horizontu a sluneční cesta pro zimní a letní slunovrat.



## 7 STATISTICKÝ PRŮZKUM

Pro zjištění skutečného stavu fotovoltaických elektráren bylo zapotřebí udělat statistický průzkum zahrnující maximální možný počet provozovatelů fotovoltaických elektráren na území ČR.

### 7.1 Forma průzkumu

Nejvhodnější formou průzkumu by bylo osobní setkání s majiteli fotovoltaických elektráren osobně a zjistit od nich vše potřebné pro tuto práci. Tato varianta však byla ihned na počátku zavrhnuta z důvodů časové i finanční náročnosti.

Na základě uvedených skutečností proto byla zvolena pro průzkum varianta online dotazníku [42], který byl rozesílán postupně majitelům fotovoltaických elektráren. Vyhledávání majitelů a provozovatelů fotovoltaických elektráren probíhalo na základě dostupného seznamu solárních elektráren na území ČR [40]. Tento seznam je sice aktuální ke dni 1. 9. 2012, avšak od té doby nebylo uvedeno do provozu mnoho elektráren, takže se celkový instalovaný výkon prakticky nezměnil. Celkový instalovaný výkon v použitém seznamu činí přibližně 2,121 GWp, zatím co ke dni 31. 12. 2016 byl 2,047 GWp [43]. Tento pokles je způsoben několika faktory. Tou pravděpodobně nejzávažnější příčinou je, že z tohoto seznamu nebyly vyňaty elektrárny, které přišly o licenci.

Dotazník se skládal z následujících sedmi otázek:

1. Název a obec, kde Vaše fotovoltaická elektrárna sídlí.
2. Jaké články Vaše elektrárna obsahuje? Monokrystalické, polykrystalické nebo amorfní? Proč jste se rozhodli pro konkrétní typ?
3. Jaký byl postup při natáčení solárních panelů? Jednalo se o simulaci, vlastní měření nebo se natočení panelů postupně dostavovalo?
4. Jaké jsou nejčastější typy závad?
5. Při poruše se panely vyměňují za nové nebo servisují? Co se dělá se starými a neopravitelnými panely?
6. Měří se pokles výkonu? Na základě stárnutí či vlivem okolních teplot? Bylo by možné poskytnout data pro statistické zpracování?
7. Jak je elektrárna připojena k síti? Jak dlouho trvalo vyřizování povolení?

### 7.2 Vyhodnocení průzkumu

Předmětem průzkumu byly elektrárny s výkonem vyšším než 500 kWp. V této skupině se v seznamu fotovoltaických elektráren, popsaného v kapitole 7.1, nachází celkem 869 elektráren, což představuje celkem 799 různých majitelů. Z tohoto počtu bylo možné kontaktovat pouze 111 majitelů. U zbylých 688 majitelů nebylo možné dohledat jakýkoliv kontakt jako např. e-mail nebo telefonní číslo. U několika elektráren, řádově to byly jednotky, měl majitel trvalý pobyt na radnici nebo v zemích, které jsou nazývány jako tzv. daňový ráj.

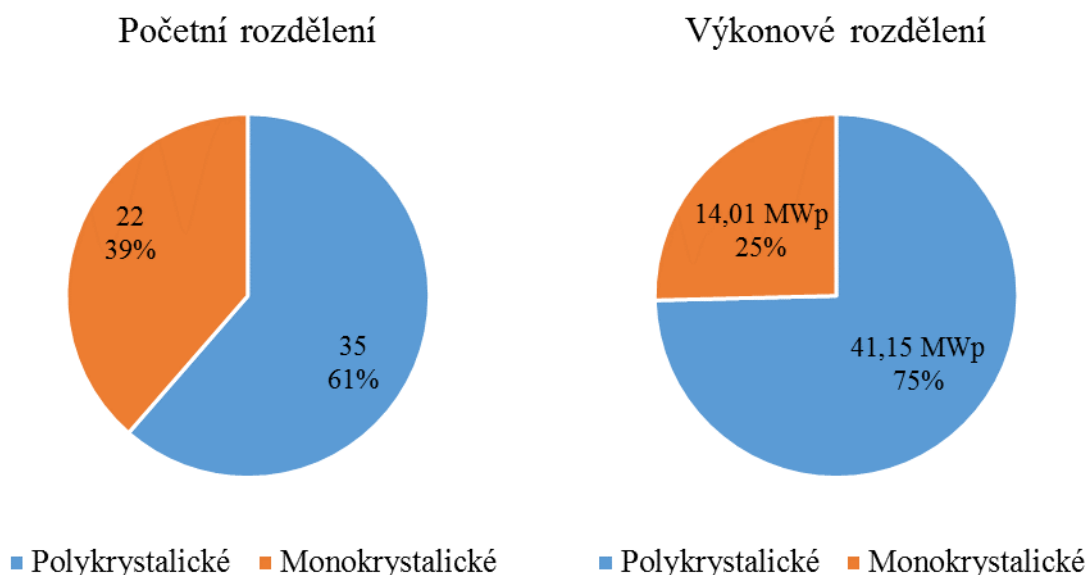
### 7.2.1 Otázka 1

Znění první otázky bylo „*Název a obec, kde Vaše fotovoltaická elektrárna sídlí. (Slouží pouze pro vlastní identifikaci a v práci nebude zohledněno)*“. Úkolem této otázky bylo zjistit výkon všech elektráren, které se průzkumu zúčastnily, jelikož z následujících odpovědí by nemuselo být zřejmé kolik elektráren o jakém výkonu respondent vlastní. Celkem tedy z celkového počtu 111 kontaktovaných majitelů a provozovatelů elektráren vyplnilo dotazník 15 z nich, 3 vyjádřili nezájem se dotazníku zúčastnit a zbylých 93 na email nereagovalo a dotazník nevyplnilo. Vyplnění dotazníku 15 majiteli znamená informace o celkem 57 fotovoltaických elektrárnách o celkovém výkonu 55,15 MWp.

### 7.2.2 Otázka 2

Znění druhé otázky bylo „*Jaké články Vaše elektrárna obsahuje? Monokrystalické, polykrystalické nebo amorfní? Proč jste se rozhodli pro konkrétní typ?*“. Tato otázka sloužila k zjištění, jaké typy panelů na území ČR převládají a jaký byl hlavní argument při jejich výběru.

Z výsledků dotazníku vyplynulo, že u fotovoltaických elektráren s výkonem vyšším než 0,5 MWp jsou používány pouze krystalické panely s naprostou dominancí polykrystalických panelů. Konkrétně se jedná o poměr 22 elektráren s monokrystalickými panely proti 35 elektrárnám s polykrystalickými panely. Což procentuálně odpovídá poměru 39 %:61 %. Pokud by hodnotícím kritériem byl instalovaný výkon, připadá monokrystalickým panelům celkový výkon 14,01 MWp a polykrystalickým 41,15 MWp. Toto rozdělení poté procentuálně odpovídá poměru 25 %: 75 %. Výše popsaná rozdělení jsou znázorněna ve výšečových grafech na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Rozdělení typů panelů podle celkového počtu a podle instalovaného výkonu.

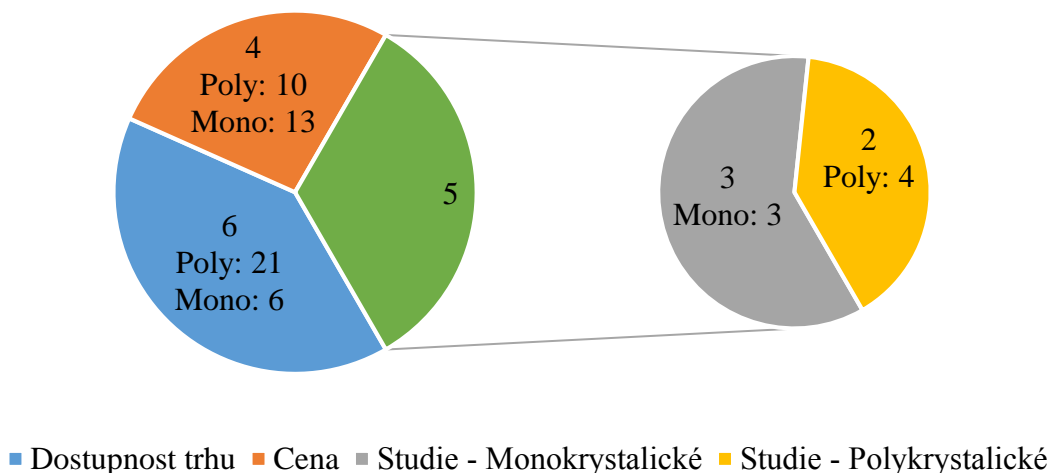
Podotázkou byl dotaz, podle jakého faktoru byl vybrán konkrétní typ panelu. Celkem 6 provozovatelů fotovoltaických elektráren bylo nuceno omezit svůj výběr vzhledem k

aktuálnímu stavu trhu mezi lety 2008 a 2010. Právě v tomto období probíhala největší expanze fotovoltaických elektráren, jejímž důsledkem byl vznik akutního nedostatku fotovoltaických panelů s následnými dlouhými čekacími lhůtami. V případě překlenutí čekací doby do následujícího roku tedy došlo ke snížení státní podpory a s tím spojené komplikace jako např. prodloužení návratnosti investice. Tímto faktorem tedy bylo ovlivněno 21 elektráren, jež jsou provozovány s polykrystalickými panely a 6 s panely monokrystalickými.

Druhým faktorem, který rozhodoval při výběru fotovoltaických panelů byla vlastní studie, při které provozovatelé elektráren posuzovali, který typ panelů pro ně bude výhodnější. Takovouto studii si nechalo zpracovat celkem pět provozovatelů, přičemž tři se rozhodli pro monokrystalické panely. Každý z těchto třech provozovatelů vlastní po jedné elektrárně. Zbylí dva provozovatelé se podle studie rozhodli pro články polykrystalické. Tito dva provozovatelé vlastní celkem čtyři elektrárny. Jeden z těchto majitelů provozující elektrárnu s monokrystalickými panely v dotazníku uvedl, že zpětně považuje tuto volbu za chybnou.

Posledním zmíněným faktorem, který rozhodoval při výběru konkrétního typu panelů, byla cena. Tento faktor byl rozhodující pro 4 provozovatele, což znamená 10 elektráren s polykrystalickými panely a 13 s monokrystalickými. Jedním z respondentů, který se při výběru panelů rozhoduje podle ceny je i provozovatel, jež vlastní celkem 19 fotovoltaických elektráren. Celkem 8 s panely polykrystalickými a 11 s monokrystalickými. Ten uvedl, že cena panelů je pro něj důležitá především z důvodu, že při měření výroby je rozdíl mezi monokrystalickými a polykrystalickými panely do 1 % ročně. Výše popsané faktory jsou rozděleny ve výšečném grafu na obrázku 7.2.

Faktory výběru panelů



Obrázek 7.2: Faktory jež rozhodly o výběru panelů.

### 7.2.3 Otázka 3

Znění třetí otázky bylo „*Jaký byl postup při natáčení solárních panelů? Jednalo se o simulaci, vlastní měření nebo se natočení panelů postupně dolad'ovalo?*“. Tato otázka sloužila k zjištění, zdali při orientaci fotovoltaických panelů byl brán důraz na výsledky simulačních

programů nebo se provozovatelé odchýlili od simulací a přizpůsobili orientaci tvaru stavební parcely.

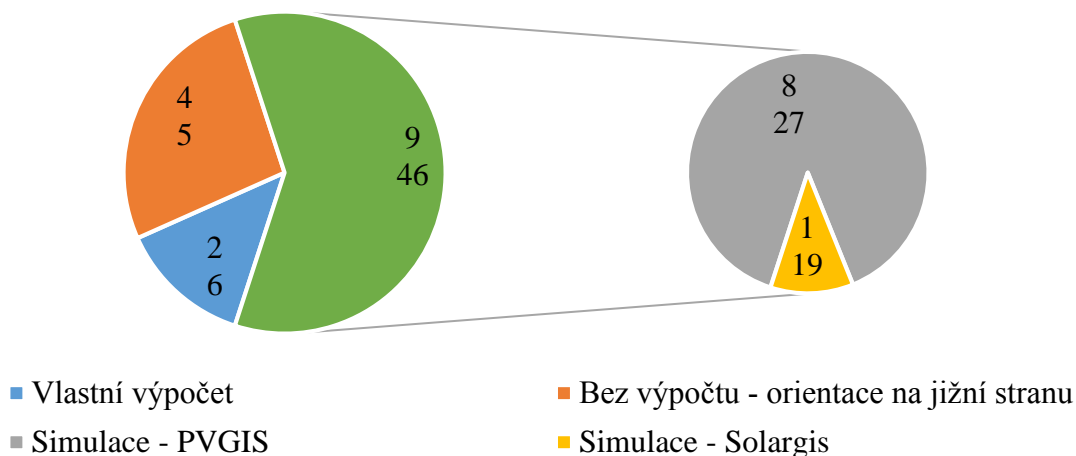
Z výsledků dotazníku vyplynulo, že nadpoloviční většina respondentů použila při určení orientace a sklonu fotovoltaické elektrárny simulační program. Celkem jde o 9 provozovatelů, jež provozují celkem 46 elektráren. Z nich 8 používá simulační program PVGIS, jenž je popsán v kapitole 6.3, jeden z provozovatelů poté použil simulační program Solargis. Jedná se o placený program s několika pokročilejšími funkcemi v porovnání s PVGIS. Vzhledem k ceně je však vhodný spíše pro provozovatele, kteří plánují výstavbu většího počtu fotovoltaických elektráren. Od jednoho z majitelů, který svou elektrárnu navrhoval s pomocí programu PVGIS, bylo uvedeno, že část jeho elektrárny je instalována na polohovacím systému. Tento systém zaručuje, že fotovoltaické panely se v průběhu dne otáčejí za sluncem a jsou schopny dostat vyšší výkon z aktuálního osvětlení. Podle majitele této elektrárny je výtěžnost větší o 25 %. Nevýhodou však je větší prostorová náročnost. Porovnání prostorového využití pohyblivého a statického systému z leteckého snímku je na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3: Porovnání prostorového využití pohyblivé elektrárny (vlevo) a statické (vlevo).

Druhou největší skupinou jsou provozovatelé, kteří se při projektování fotovoltaické elektrárny obešli bez simulace i výpočtu. Tento důvod byl v dotazníku uveden celkem u čtyř provozovatelů, což představuje celkem pět fotovoltaických elektráren. Většinovým popisovaným důvodem byla střešní instalace, kde je orientace i sklon dán konstrukcí, popř. orientace stavební parcely. Poslední metodou, která byla zmiňována, je vlastní výpočet, který byl uveden šesti respondenty. Výše popsané metody určení orientace a sklonu jsou rozděleny ve výšečovém grafu na obrázku 7.4, kde horní číslo vyjadřuje počet respondentů a dolní počet elektráren.

### Určení orientace fotovoltaické elektrárny



Obrázek 7.4: Postup při určování orientace fotovoltaické elektrárny.

#### 7.2.1 Otázka 4

Znění čtvrté otázky bylo „*Jaké jsou nejčastější typy závad?*“. Tato otázka sloužila k zjištění, jaký je nejčastější důvod odstávky fotovoltaické elektrárny. Zda-li jsou to závady na fotovoltaických panelech nebo na okolních přídružených systémech. V této otázce bylo na rozdíl od předchozích možné napsat i více druhů závad. Z toho důvodu je následující počet odpovědí větší než celkový počet respondentů.

Nejčastěji zmíněným důvodem nefunkčnosti systému byla závada na měniči. Toto bylo uvedeno celkem deseti respondenty s celkovým počtem 49 elektráren. Mezi uvedené závady na měniči patřily chyby v komunikaci mezi měničem a vyhodnocovacím serverem, vyhořelá elektronika a vybavené jističe následkem přetíženého měniče. Z těchto popsanych příčin je tedy možné vydedukovat, že hlavními příčinami výpadků jsou levné, nekvalitní měniče a jejich poddimenzování a přetěžování.

Druhou nejčastější závadou je mechanické poškození vlivem špatné montáže. Tato závada byla označena pěti provozovateli fotovoltaických elektráren. Jednalo se celkem o 28 elektráren. Mezi mechanické poškození vlivem špatné montáže bylo zařazeno praskání konstrukčních částí panelů, odkryté kabely a jejich napadení hlodavci a mechanické poškození při sečení. Nedostatečnému chránění kabelů před hlodavci se věnuje kapitola 5.1. Od jednoho z majitelů bylo uvedeno, že k mechanickému poškození panelů u něj dochází při odlétání kamenů při sečení trávy. Toto je způsobeno nevhodnou nosnou konstrukcí, která je příliš nízko nad zemí (odhadem za pomoci panoramatického snímku na mapy.cz se nejedná ani o 40 cm). Mezi standardizované testy fotovoltaických panelů patří testování odolnosti proti ledovým kroupám. Panel v tomto testu musí vydržet náraz ledovou koulí od průměru 12,5 mm do 35 mm s rychlostí od 30 m/s do 39,5 m/s. [44] Oproti tomu standardní travní sekačka je schopna vrhat dřevěné a kamenné předměty, na které narazí, rychlostí až 44 m/s [45]. U velké části elektráren, které mezi časté závady označily mechanické poškození vlivem špatné montáže bylo vyzpozorováno, že jejich zahájení provozu bylo v prvním a začátkem druhého čtvrtletí daného roku. Z toho lze

usuzovat, že jejich mechanická montáž proběhla mezi začátkem roku spuštění a koncem roku předešlého. Tedy v době, kdy na našem území převládají teploty kolem 0 °C. Montáž v naprosté většině případů probíhá na hliníkové konstrukce. Z této úvahy lze tedy vyvodit, že k mechanickému poškození může docházet vlivem teplotní roztažnosti hliníkové konstrukce v součinnosti s pevnou montáží fotovoltaických panelů.

Třetí nejčastější závadou jsou horká místa (hotspoty). Tato závada byla uvedena třemi provozovateli fotovoltaických elektráren a jednalo se celkem o 18 elektráren. Popis horkých míst je v kapitole 5.3.

Poslední uváděnou závadou je vyhoření překlenovacích (bypass) diod. Tato závada byla uvedena celkem dvěma provozovateli a jednalo se celkem o 16 elektráren. Oba provozovatelé shodně uvedli, že k vyhoření těchto překlenovacích diod dochází nejčastěji po zásahu bleskem. Popis překlenovacích diod je v kapitole 5.2. a uvedené typy častých závad jsou v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Důvody nefunkčnosti fotovoltaických elektráren

Závada	Počet majitelů	Počet elektráren	Celkový postihovaný výkon [MWp]
Závada na střídači	10	49	49,61
Mechanické poškození – špatná montáž, sečení, odkryté kabely	5	28	25,43
Horká místa (hotspoty)	3	18	21,43
Vyhoření překlenovacích (bypass) diod	2	16	19,92

## 7.2.2 Otázka 5

Znění páté otázky bylo „*Při poruše se panely vyměňují za nové nebo servisují? Co se dělá se starými a neopravitelnými panely?*“. Cílem otázky bylo zjistit, jak je nakládáno s poškozenými panely a jak je zajištěna ekologická likvidace již neopravitelných panelů. Na tuto otázku bylo odpovězeno od všech patnácti respondentů.

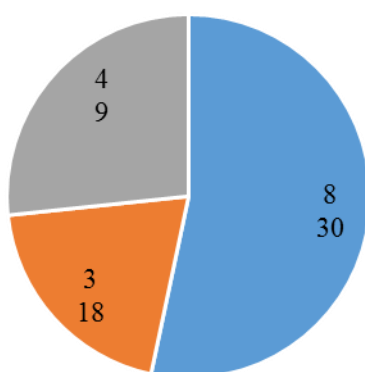
Z výsledků průzkumu vyplynulo, že nadpoloviční většinou provozovatelů zatím nemusela být řešena žádná závada na fotovoltaickém panelu. Tato informace je více než příznivá, je-li uvaženo, že nejnovější z těchto elektráren je z roku 2010, tedy téměř v polovině své morální životnosti. Následujícími sedmi provozovateli již byly závady na fotovoltaických panelech řešeny. Pokud se jednalo o závadu opravitelnou jako např. poruchy překlenovacích diod, vždy byla opravena samotným provozovatelem. Jednalo-li se o závadu složitější jako např. poškození tvrzeného skla, kritická hodnota horkých míst, pak následovala jejich reklamace, popř. výměna za nový kus. Tato otázka byla negativně ovlivněna tím, že se v ní provozovatelé vyjadřovali ke všem svým elektrárnám dohromady, nikoliv zvlášť. Je tedy pravděpodobné, že počet fotovoltaických elektráren bez poruchy panelu je mnohem vyšší. Výsledek této otázky je zpracován v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2: Statistika poruch fotovoltaických panelů.

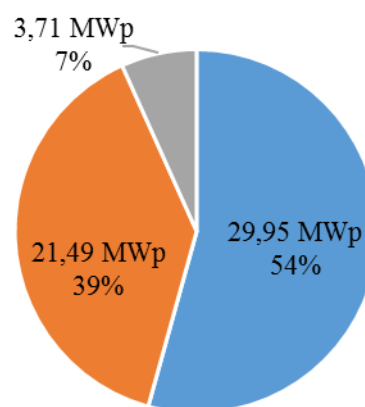
Závada	Počet provozovatelů	Počet elektráren	Celkový instalovaný výkon [MWp]
Bez poruchy panelů	8	15	6,17
Vlastní servis/Reklamáce/Výměna za nový	7	42	48,98

V případě podotázky, jak je nakládáno s neopravitelnými panely, bylo všemi respondenty shodně zodpovězeno, že jsou registrováni u jedné z licencovaných firem pro ekologické zpracování vysloužilých fotovoltaických panelů. Celkem osmi respondenty bylo přiznáno, že jejich elektrárna je registrována u společnosti Resolar s.r.o., což představuje celkem 30 elektráren s celkovým instalovaným výkonem 29,95 MWp. Třemi respondenty bylo přiznáno, že jejich elektrárna je registrována u společnosti Asekol Solar s.r.o., což představuje celkem 18 elektráren o celkovém instalovaném výkonu 21,49 MWp. Zbylými čtyřmi respondenty nebyla uvedena společnost u které jsou registrováni. Výše zmíněné údaje jsou uvedeny ve výšečových grafech na obrázku 7.5.

Rozdělení podle počtu provozovatelů



Výkonové rozdělení



■ Resolar ■ Asekol ■ Bez odpovědi ■ Resolar ■ Asekol ■ Bez odpovědi

Obrázek 7.5: Výběr firem nabízející ekologickou recyklaci fotovoltaických panelů.

### 7.2.3 Otázka 6

Znění šesté otázky bylo „*Měří se pokles výkonu? Na základě stárnutí či vlivem okolních teplot? Bylo by možné poskytnout data pro statistické zpracování?*“. Otázka sloužila ke zjištění, zdali jsou elektrárny během provozu monitorovány a jakým způsobem je měřeno jejich stárnutí. Na tuto otázku odpovědělo celkem 14 respondentů z celkových 15, což odpovídá celkem 55 elektrárnám. Bohužel od žádného z respondentů nebyla poskytnuta data pro podrobnější statistické zpracování.

Oproti prvotnímu očekávání je monitoring fotovoltaických elektráren jen velice povrchní. Naprostá většina provozovatelů, celkem 14, hodnotí stav své elektrárny pouze na základě hodnot přijatých od měniče a následnou dlouhodobou analýzou těchto hodnot. Jeden z těchto



provozovatelů pak tyto údaje navíc porovnává se statistikou slunečných dnů. Zbývajícím provozovatel elektrárny monitoruje pouze pravidelným snímáním termokamerou a vyhledáváním horkých míst.

Několik respondentů uvedlo, že pozorování stárnutí a degradace panelů není během běžného provozu v praxi příliš možné. Vliv proměnlivé hodnoty slunečního záření má totiž na celkový výkon mnohem větší vliv. Od provozovatele, který vlastní celkem 19 fotovoltaických bylo uvedeno, že v roce 2016 bylo vyrobeno více MWh, než v roce 2007. Tato informace může také potvrzovat tvrzení, že ačkoliv výrobci garantují maximální pokles výkonu vlivem stárnutí 1 %/rok, reálná hodnota je mnohem menší. Testování stárnutí zábleskovou metodou bylo uvedeno pouze od dvou respondentů. První test provádí pravidelně s jednoročním intervalem na každé ze svých tří elektráren, a to vždy u stejných panelů a u náhodně vybraného vzorku panelů. Druhým pak bylo provedeno měření zábleskovou metodou u náhodně vybraného vzorku panelů před koncem záruční doby. Ta činila 10 let a byla garantována minimálně 90 % štítkového výkonu.

#### **7.2.4 Otázka 7**

Znění sedmé otázky bylo „***Jak je elektrárna připojena k síti? Jak dlouho trvalo vyřizování povolení?***“. Snahou této otázky bylo zjistit bližší specifikace připojení jako např. kolik obsahuje elektrárna střídačů atd. Respondenti zde povětšinou odpovídali, zdali je elektrárna připojena do místní distribuční sítě 22 kV nebo 35 kV.

Vyřízení povolení se u respondentů pohybovalo od dvou do deseti měsíců. Roli hrálo, kolik povolení bylo za potřebí pro stavbu získat. Pokud se jednalo pouze o stavební povolení a následné udělení licence pro výrobu elektřiny, pak celá byrokratická část nebyla delší jak 3 měsíce. V případě, že bylo potřeba zažádat navíc o změnu územního plánu, bylo vyřizování delší ovšem ne více jak deset měsíců.



# ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo nejen podat přehlednou informaci o problematice fotovoltaických elektráren, ale především vytvořit bázi pro vytvoření dalších legislativních podmínek pro provoz a likvidaci v souvislosti s šetrným přístupem k životnímu prostředí. I když je práce zaměřena na oblast České republiky, lze předpokládat, že některé závěry mohou být využity i celosvětově.

Úvodní kapitola byla rešerší k historii a aktuálnímu stavu fotovoltaiky. Byl popsán systém nevhodně nastavených a pozdě regulovaných dotací, které vedly k nekontrolovatelnému rozmachu fotovoltaických elektráren na území České republiky.

Následující kapitola byla věnována teoretickému popisu principů funkce fotovoltaické elektrárny a popisuje rozdíly mezi třemi základními typy fotovoltaických článků. Dále ukazuje výsledky průzkumu trhu z roku 2015, ze kterých vyplynulo, že více než 90 % trhu zabírají panely krystalické. Jen velmi malé procento poté patřilo trhu s tenkovrstvými panely.

Třetí kapitola již byla více věnována samotné ekologii spojené s fotovoltaikou. Nejprve byl obecně popsán fotovoltaický panel a následně vytvořen přehled současných fotovoltaických panelů s podstatnými technickými parametry. V následující podkapitole byla popsána životnost panelů a přinesla také výsledky dříve provedených průzkumů. Z těch vyplynulo, že většina majitelů fotovoltaických elektráren plánuje provoz i po ukončení státní podpory. Necelá polovina poté plánuje rekonstrukci elektrárny. V další podkapitole byly popsány jednotlivé materiály, ze kterých je fotovoltaický panel složen, včetně jejich výtěžnosti z recyklace. Nakonec byly popsány způsoby recyklace panelů včetně ekonomického hlediska. Z této kapitoly bylo usouzeno, že finanční a technologické řešení recyklace fotovoltaických elektráren je téměř vyřešené. Zbývá tedy otázka, kdy a v jakém rozsahu bude vhodné vybudovat na našem území zařízení na recyklaci fotovoltaických panelů tak, aby byla finančně rentabilní. Z vlastního osobního názoru se jako nejvhodnější jeví doba mezi lety 2029 a 2032. Během těchto let skončí státní podpora elektrárnám z doby největšího rozmachu a bude možné recyklovat poškozené panely, které bude nutné vyměnit za nové. Dále od této doby bude vzrůstat počet elektráren, které svou činnost kompletně ukončí. Do této doby bude možné odvážet vysloužilé fotovoltaické panely do Německa, které již má zařízení pro recyklaci panelů. Další recyklační zařízení budou v Německu přibývat přibližně kolem roku 2020.

Ve čtvrté kapitole bylo zobrazeno a popsáno obecné schéma zapojení fotovoltaických elektráren.

V páté kapitole byly popsány závady typické pro současné fotovoltaické elektrárny. Popsané závady přitom reflektovaly výsledky vlastního průzkumu mezi majiteli fotovoltaických elektráren. Dále bylo popsáno, proč momentálně není možné měnit poškozené fotovoltaické panely.

V šesté kapitole bylo popsáno slunečního záření nad Českou republikou, a názornou ukázkou programu pro simulaci fotovoltaických elektráren s programem PVGIS.

Sedmá kapitola obsahuje statistický průzkum založený na otázkách týkajících se informací o některých zásadních faktech vztažených k provozu fotovoltaických elektráren. Zde se jedná především o typ použitých článků, jejich orientaci v prostoru, typy závad a jejich odstraňování a také likvidaci. Z výsledků vyplynulo, že 75 % instalovaného výkonu, z elektráren, které se zúčastnily průzkumu používá články polykrystalické. Při výběru konkrétního typu však ale u

nadpoloviční většiny dotázaných hrála hlavní roli dostupnost na trhu a cena. Studie o vhodnosti konkrétního typu byla až druhořadá. V následující otázce bylo zjištěno, že nadpoloviční většina dotázaných se při určování orientace elektrárny spoléhá na výsledky simulačního programu. Pravděpodobně nejpodstatnějším přínosem byly otázky zabývající se poruchovostí elektráren a jejich opravy. Zde bylo zjištěno, že nejčastější poruchou jsou výpadky samotných střídačů, kdy následně dochází k největším ekonomickým ztrátám. S výpadky střídačů se potýká většina dotázaných provozovatelů. Jako druhou nejčastější závadou byly označeny mechanické poruchy, které většinou způsobila špatná montáž, hlodavci či prasknutí skla následkem sečení. Jen minimem majitelů byly označeny závady tzv. horkých míst a vyhoření překlenovacích diod. Jelikož se v dotazníku neobjevily závady jako např. hlemýždí stopy, delaminace fotovoltaických panelů či prasknutí samotného článku, je pravděpodobné, že tyto závady budou celkovém měřítku fotovoltaických elektráren zanedbatelné. Dalším zjištěním je, že ačkoliv to zákon nedovoluje, vyměňují provozovatelé na svých elektrárnách vadné fotovoltaické panely za nové. Riskují tedy ztrátu licence a s ní obrovské finanční ztráty. Posledním zjištěním bylo, že většinou majitelů je zcela zanedbán monitoring fotovoltaických elektráren. S tím následně souvisí časté výpadky střídačů.

Z uvedených skutečností lze vyvodit následující závěry a doporučení. Pokud při likvidaci tentokrát zvítězí zájmy ekologické nad zájmy politickými, mohlo by dojít k mírnému zmírnění následků, které rozmach fotovoltaických elektráren vyvolal. V současné době se totiž zdá, že při likvidaci elektrárny by mohli mít majitelé díky recyklaci motivaci, získat část svých nákladů zpět. Tím by mohlo být zajištěno, že po konci státní podpory zde nezůstane spousta opuštěných fotovoltaických elektráren, ale čistá odpočínutá pole připravena na osetí. Osobním doporučením je úprava legislativy, směřující ke snížení pravděpodobnosti výskytu takto opuštěných elektráren s možným definováním postihů.

Tato práce by mohla mít pokračování přibližně v roce 2025, kdy dojde k rozšíření recyklačních zařízení v Německu. Mohlo by se tedy jednat o práci, ve které by byla navržena optimalizace výstavby recyklačních zařízení pro území České republiky. Součástí této práce by pak mohlo být varování před chybami, kterých se při stavbě těchto zařízení v Německu dopustili. Následovat by mohla práce po ukončení státní podpory fotovoltaických elektráren. Ta by mohla popsat, zdali jsou elektrárny beze změny provozovány dál, rekonstruovány, likvidovány nebo vypnuty a opuštěny. Následujícím tématem by mohlo být porovnání současných recyklačních vizí se skutečnou podobou recyklace.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SHOEMAKER OHL, Russell. *Light-Sensitive electric device*. Spojené státy americké. US 2402662. Uděleno 25. 6. 1946.
- [2] BECHNÍK, Bronislav. Stručná historie fotovoltaiky. *TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [3] BURKET, Daneš. Dukovanská fotovoltaiická elektrárna. Třípól [online]. 2009, 2009(1), 1 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1043-dukovanska-fotovoltaiicka-elektrarna>
- [4] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů: zákon o podpoře využívání obnovitelných zdroj. In: *Sbírka zákonů*. Česká republika: Tiskárna ministerstva vnitra, 2005, ročník 2005, Kč 12,50, číslo 180.
- [5] *Renewable Energy World* [online]. Spojené státy americké [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyworld.com>
- [6] Roční zprávy o provozu. *Energetický regulační úřad* [online]. Jihlava [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/rocnizpravy-o-provozu>
- [7] Příčiny solárního boomu v České republice. *O energetice* [online]. 2015 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/priciny-solarniho-boomu/>
- [8] *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [www.eru.cz](http://www.eru.cz)
- [9] 5 největších solárních elektráren v ČR. *Nazeleno* [online]. Praha, 2011 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/aktualne/5-nejvetsich-solarnich-elektraren-v-cr.aspx>
- [10] Fotovoltaika. *TZB-info: technická zařízení budov* [online]. 2013 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika>
- [11] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. Praha: T. Malina, 1994. ISBN 80-900-7595-9.
- [12] SOLÁRNÍ KONSTANTA. *ČEZ* [online]. Plzeň, 1999 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykkladovy-slovník-energetiky/hesla/solar\\_konst.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykkladovy-slovník-energetiky/hesla/solar_konst.html)
- [13] SMALE, Alan. The Electromagnetic Spectrum. In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Houston, 2013 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- [14] Teorie fotovoltaiky. *Isofen Energy* [online]. České Budějovice, 2016 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.elektrinazestrechy.cz/fotovoltaika.aspx>
- [15] ŠEVČÍKOVÁ, Lenka, Sylva KLÍMOVÁ a Danuše ČUPROVÁ. Pasivní solární energie - nové trendy. *TZB-info* [online]. Brno, 2003 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1705-pasivni-solarni-energie-nove-trendy>
- [16] LIBRA, Martin. Fotovoltaiické články a panely jako prostředek k využití solární energie. *AGROjournal* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.agrojournal.cz/clanky/fotovoltaiicke-clanky-a-panely-jako-prostredek-k-vyuziti-solarni-energie-169>
- [17] Fotovoltaika. *WEB Větrná Energie s.r.o.* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/fotovoltaika\\_11](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/fotovoltaika_11)

- [18] FRANZ, Manuela. Environmental Potential of Roof-Top Photovoltaic Power Plants by the Example of Eggenburg: Informed Decision Making. In: *10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien* [online]. Vídeň, 2017, s. 8 [cit. 2017-05-05].
- [19] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [20] Fotovoltaické panely. *HQ Line* [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.hqline.com/fotovoltaicke-panely>
- [21] Wp. *Zkratky.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.zkratky.cz/Wp/16927>
- [22] BECHNÍK, Bronislav. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. *TZB-info* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>
- [23] BECHNÍK, Bronislav, Radim BAŘINKA a Pavel ČECH. Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů. In: *3. fotovoltaická konference* [online]. Rožnov pod Radhoštěm, 2008, s. 6 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/files/pdf/BechnikBarinkaCech.pdf>
- [24] Zákonné povinnosti provozovatele. *Resolar* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.resolar.cz/cs/pro-provozovatele-fve/zakonne-povinnosti-provozovatele>
- [25] Vyhláška k recyklaci fotovoltaických panelů zveřejněna. *TZB-info* [online]. Praha, 2013 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/112642-vyhlaska-k-recyklaci-fotovoltaickych-panelu-zverejnena>
- [26] Obecné schéma zapojení fotovoltaického zdroje. *OEZ* [online]. Letohrad, 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/aktuality/obecne-schema-zapojeni-fotovoltaickeho-zdroje>
- [27] ABB central inverter now available up to 1000 kW size. In: *ABB* [online]. Curych, 2013 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/480a25751d744e92c1257b43004ec2d9.aspx>
- [28] GEL a AGM baterie. *Victron Energy* [online]. Almere Haven [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/batteries/gel-and-agm-batteries>
- [29] MATAJS, Vladimír a Michaela MATAJSOVÁ. Jak funguje ostrovní fotovoltaický systém? *Solární experti* [online]. České Budějovice, 2015 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.solarniexpert.cz/jak-funguje-ostrovní-off-grid-fotovoltaický-system/>
- [30] TriStar MPPT. *MorningStar* [online]. Newton [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.morningstarcorp.com/products/tristar-mppt/>
- [31] BlueSolar MPPT 100/30. *Victron Energy* [online]. Almere Haven, 2016 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/solar-charge-controllers/mppt-100-30>
- [32] QUASCHNING, Volker. *Understanding renewable energy systems*. Sterling, VA: Earthscan, 2005. ISBN 1-84407-136-7.
- [33] <http://www.sunfin.cz/www/upload/images/pdf-soubory/posuzovani-poruchy-solarnich-panelu.pdf> 8.3. TOMEŠ, Milan. Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011. Ostrava, 2012. Unie soudních znalců.
- [34] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Hot Spot Heating. *PV Education* [online]. 2012 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/hot-spot-heating>
- [35] SOLAR PANELS INSPECTIONS (PHOTOVOLTAIC SYSTEMS). *RovDrone* [online]. Warsaw, 2016 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://rovdrone.eu/drone-en/industrial-inspections/solar-panels-inspections-photovoltaic-systems/>
- [36] HOCHMAN, Vladimír. Nejčastější poruchy střídačů: Konference Chytré technologie. In: *YouTube* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <https://youtu.be/dAu5wY-wOgY>

- [37] [Http://www.tzb-energ.cz/mereni-fotovoltaiky.html](http://www.tzb-energ.cz/mereni-fotovoltaiky.html). *TZB-energ* [online]. Ústí nad Labem, 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.tzb-energ.cz/mereni-fotovoltaiky.html>
- [38] Fotovoltaika v podmínkách České republiky. *Isofen Energy* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [39] *Photovoltaic Geographical Information System: Interactive Maps* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- [40] *Solární elektrárny v ČR* [online]. 2012 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.elektrarny.pro>
- [41] TWxxxP60-FA. In: *Tianwei* [online]. Chengdu, 2011 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [http://www.twnesolar.com/uploadfiles/product/1378818655\\_apzR5uk61n.pdf](http://www.twnesolar.com/uploadfiles/product/1378818655_apzR5uk61n.pdf)
- [42] Diplomová práce: Studie fotovoltaických elektráren v ČR a jejich budoucnost. *Survio* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://www.survio.com/survey/d/V9O3I7Q3H9S1Y8Q7O>
- [43] *Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR: IV. čtvrtletí 2016*. Jihlava, 2016. Dostupné také z: [http://www.eru.cz/documents/10540/2298821/Ctvrtletni\\_zprava\\_2016\\_IV\\_Q.PDF](http://www.eru.cz/documents/10540/2298821/Ctvrtletni_zprava_2016_IV_Q.PDF)
- [44] ARNDT, Regan a Robert PUTO. *Basic Understanding of IEC Standard Testing For Photovoltaic Panels*. Peabody: TÜV, 2010. Dostupné také z: <https://www.tuvamerica.com/services/photovoltaics/ArticleBasicUnderstandingPV.pdf>
- [45] Lawn Mower and Tractor Safety. *Jack small engines: DIY* [online]. Forest Hill, 2015 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://www.jacksmallengines.com/diy/lawn-mower-and-tractor-safety/>